

# **ELIMINACIÓN DE COLIFORMES TOTALES Y FECALIS DE AGUAS CRUDAS MEDIANTE ELECTRO-OXIDACIÓN**

ISABELITA ALJURE ALVEAR

SUSANA LEÓN GÓMEZ

ASESOR: PROFESOR EDISON GILPAVAS

DIRECTOR GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN PROCESOS AMBIENTALES -GIPAB

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN



UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS

MEDELLÍN

2016

# **ELIMINACIÓN DE COLIFORMES TOTALES Y FECALIS DE AGUAS CRUDAS MEDIANTE ELECTRO-OXIDACIÓN**

**ISABELITA ALJURE ALVEAR**

**SUSANA LEÓN GÓMEZ**

**ASESOR: PROFESOR EDISON GILPAVAS**

**DIRECTOR GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN PROCESOS AMBIENTALES - GIPAB**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN**



**UNIVERSIDAD EAFIT**

**ESCUELA DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS**

**MEDELLÍN**

**2016**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

Presidente del jurado

---

Jurado

---

Jurado

Medellín

2016

## AGRADECIMIENTOS

Al profesor asesor **EDISON GILPAVAS** agradecemos fuertemente por darnos la oportunidad de realizar esta investigación, por compartir sus conocimientos sobre el tema de una manera abierta, guiarnos y motivarnos a trabajar de la mejor manera posible y perseverar para alcanzar la precisión y la excelencia, teniendo constante actitud de interés hacia nuestro trabajo y la disposición para atendernos y ayudarnos en cualquier momento que fuese necesario. También queremos agradecerle por permitirnos presentar nuestro proyecto en diferentes eventos académicos, ampliando de esta forma nuestros conocimientos del tema.

Agradecemos a la **Universidad EAFIT** por brindarnos los espacios propicios para el correcto desarrollo de este proyecto además por el apoyo académico.

Al investigador del grupo GIPAB **JOSE DAVID MEDINA ARROYAVE**, por su disposición constante para brindarnos ayuda y apoyo, por acompañarnos durante el desarrollo del proyecto, compartirnos sus amplios conocimientos del tema y guiarnos en todo momento.

A **SIGIFREDO VARGAS** coordinador del laboratorio de biotecnología de la universidad EAFIT, sin su apoyo el desarrollo del proyecto no hubiera sido posible, por su paciencia y total disposición, incondicional.

A **EDGAR ARBELÁEZ** coordinador de los laboratorios de ingeniería de procesos, por su total disposición y colaboración frente a las necesidades presentadas durante el desarrollo de nuestro proyecto.

Agradecemos extraordinariamente a **NUESTRAS FAMILIAS** por su amor, comprensión y apoyo durante todo el desarrollo del proyecto de nuestras carreras y principalmente por brindarnos la oportunidad de poder formarnos profesionalmente como ingenieras y como personas íntegras.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	CONCEPTOS GENERALES .....	11
1.1.	INTRODUCCIÓN .....	11
1.2.	MARCO REFERENCIAL .....	12
1.2.1.	Agua potable .....	12
1.2.2.	Parámetros de calidad para el agua potable.....	12
1.2.3.	Proceso de potabilización de aguas .....	12
1.2.4.	Metodologías para la desinfección .....	13
1.2.5.	Los compuestos halogenados como desinfectantes.....	14
1.2.6.	Electro-oxidación en el proceso de desinfección .....	14
1.3.	ALGUNOS ANTECEDENTES.....	16
1.4.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
1.5.	OBJETIVOS .....	20
1.5.1.	Objetivo general .....	20
1.5.2.	Objetivos específicos.....	20
1.6.	ALCANCE.....	20
1.7.	CONCLUSIONES .....	21
2.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	25
2.1.	MATERIALES Y EQUIPOS.....	25
2.1.1.	Reactivos .....	25
2.1.2.	Reactor .....	25
2.1.3.	Caracterización de la muestra .....	26
2.1.4.	Métodos analíticos.....	27
2.1.5.	Métodos estadísticos .....	29
2.2.	MONTAJE E IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE ELECTRO-OXIDACIÓN .....	31
2.2.1.	Cinéticas de degradación:.....	32
2.3.	PROCEDIMIENTO .....	32
2.4.	CONCLUSIONES .....	34
2.5.	REFERENCIAS .....	34
3.	ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	35
3.1.	DISEÑO DE EXPERIMENTOS DE TAMIZADO .....	35
3.1.1.	Resultados .....	35
3.1.1.1.	Efectos estandarizados para %ECT.....	37
3.1.1.2.	Efectos estandarizados para %ECF.....	38
3.2.	DISEÑO DE EXPERIMENTOS DE OPTIMIZACIÓN .....	39

3.2.1.	Resultados .....	39
3.2.2.	Análisis estadístico de %ECT .....	40
3.2.3.	Análisis estadístico de %ECF .....	44
3.2.3.2.	Diagrama de pareto .....	45
3.2.3.3.	Efecto de la densidad de corriente.....	46
3.2.3.4.	Efecto de la conductividad .....	47
3.2.3.5.	Efecto del tipo de ánodo.....	48
3.2.3.	Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) .....	48
3.2.3.1.	Diagramas de superficie de respuesta para %ECT.....	49
3.2.3.2.	Diagramas de superficie de respuesta para %ECF.....	49
3.3.	CINÉTICAS DE ELIMINACIÓN DE COLIFORMES TOTALES Y FECALES.....	51
3.4.	CONCLUSIONES .....	55
3.5.	REFERENCIAS .....	56
4.	DISEÑO CONCEPTUAL.....	58
4.1.	DISEÑO CONCEPTUAL DEL PROCESO DE ELECTRO-OXIDACIÓN A ESCALA INDUSTRIAL.....	58
4.1.1.	Process Design Specification (PSD) .....	58
4.1.1.1.	Aguas crudas .....	59
4.1.1.2.	Especificaciones de reactivos utilizados en el proceso .....	59
4.1.1.3.	Ubicación geográfica.....	60
4.1.1.4.	Capacidad de la planta.....	60
4.1.1.5.	Servicios requeridos y disponibles .....	60
4.1.1.6.	Legislación ambiental aplicable .....	61
4.1.2.	Diagrama de entradas y salidas .....	62
4.1.3.	Diagrama de bloques del proceso (BFD) .....	62
4.1.4.	Descripción del proceso .....	63
4.1.5.	Diagrama de flujo del proceso (PFD).....	64
4.1.6.	Especificaciones técnicas de los diferentes equipos.....	65
4.2.	DISEÑO DE EQUIPOS .....	65
4.2.1.	Diseño del reactor a escala industrial .....	65
4.2.2.	Diseño del agitador.....	67
4.3.	ANÁLISIS ECONÓMICO .....	69
4.3.1.	Costo de Capital .....	69
4.3.1.1.	Costos de capital con electrodo DDB.....	70
4.3.1.2.	Costos de capital con electrodo de grafito.....	70

4.3.2.	Depreciación .....	71
4.3.2.1.	Depreciación con electrodo DDB.....	71
4.3.2.2.	Depreciación con electrodo de grafito.....	72
4.3.3.	Costo de materia prima .....	73
4.3.4.	Costos de Operación.....	73
4.3.4.1.	Costos de mano de obra .....	73
4.3.5.	Costos indirectos .....	76
4.3.6.	Costos Totales .....	76
4.3.7.	Financiación del proyecto .....	77
4.3.8.	Flujo de caja libre.....	78
4.4.	CONCLUSIONES .....	80
4.5.	REFERENCIAS .....	81
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	83
5.1.	Conclusiones .....	83
5.2.	Recomendaciones.....	84
6.	ANEXOS.....	86
6.1.	Eventos en que ha participado el Proyecto.....	86

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 2. 1.</b>	Caracterización inicial del agua utilizada en la investigación.....	26
<b>Tabla 2. 2.</b>	Factores estudiados y niveles de cada factor en el DOE factorial fraccionado $2^{5-1}$ .....	29
<b>Tabla 2. 3.</b>	Diseño de experimentos factorial fraccionado $2^{5-1}$ con tres puntos centrales.....	29
<b>Tabla 2. 4.</b>	Factores estudiados y niveles de cada factor en el DBB .....	31
<b>Tabla 2. 5.</b>	Diseño de experimentos de optimización Box-Behnken.....	31
<b>Tabla 3. 1.</b>	Resultados diseño de experimentos factorial fraccionado $2^{5-1}$ .....	35
<b>Tabla 3. 2.</b>	Resultados diseño de experimentos Box-Behnken * .....	39
<b>Tabla 3. 3.</b>	ANOVA para %ECT, diseño Box-Behnken .....	40
<b>Tabla 3. 4.</b>	ANOVA para %ECF, diseño Box-Behnken .....	45
<b>Tabla 3. 5.</b>	Cinética de eliminación de coliformes totales y fecales.....	51
<b>Tabla 3. 6.</b>	Caracterización del agua antes y después del estudio cinético.....	54
<b>Tabla 4. 1.</b>	Especificaciones del agua utilizada para el desarrollo del proyecto. ....	59
<b>Tabla 4. 2.</b>	Características del agua una vez realizado el tratamiento. (MINISTERIO DE PROTECCIÓN SOCIAL, AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2007). ....	59
<b>Tabla 4. 3.</b>	Especificaciones de los equipos para el proceso de electro-desinfección. ....	65
<b>Tabla 4. 4.</b>	Especificaciones Reactor Electro- desinfección a escala industrial. ....	66
<b>Tabla 4. 5.</b>	Datos utilizados para el cálculo del Área total de electrodos a escala industrial. ....	66

<b>Tabla 4. 6.</b> Medidas de diseño geométrico del agitador para el tanque de EO.....	68
<b>Tabla 4. 7.</b> Información requerida para el cálculo de velocidad de agitación a escala industrial.....	68
<b>Tabla 4. 8.</b> Resultados agitador a escala industrial.....	69
<b>Tabla 4. 9.</b> Costos del proyecto utilizando electrodo DDB.....	70
<b>Tabla 4. 10.</b> Costos del proyecto utilizando electrodo grafito.....	70
<b>Tabla 4. 11.</b> Depreciación de equipos, muebles y enseres en \$USD utilizando electrodo DDB.....	71
<b>Tabla 4. 12.</b> Depreciación de equipos, muebles y enseres en \$USD utilizando electrodo de grafito. .....	72
<b>Tabla 4. 13.</b> Costo de $\text{Na}_2\text{SO}_4$ requerido en un mes de operación en \$COP.....	73
<b>Tabla 4. 14.</b> Número de operarios .....	74
<b>Tabla 4. 15.</b> Salario mensual del personal de la planta en \$COP.....	75
<b>Tabla 4. 16.</b> Perfil de los empleados de la planta .....	75
<b>Tabla 4. 17.</b> Consumo eléctrico y costo asociado a los equipos utilizando electrodo de grafito y DDB .....	76
<b>Tabla 4. 18.</b> Costo total implementación del proyecto.....	77
<b>Tabla 4. 19.</b> Plan de financiación del proyecto. ....	77
<b>Tabla 4. 20.</b> Flujo de caja proyectado a 10 años en \$USD utilizando electrodo de DDB.....	78
<b>Tabla 4. 21.</b> Flujo de caja proyectado a 10 años en \$USD utilizando electrodo Grafito. ....	79

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1. 1.</b> Proceso de potabilización de aguas adaptado del proceso estándar de empresa EPM: (EPM, 2013).....	13
<b>Figura 2. 1.</b> Placa Petri-film con CT y CF (Coliformes y E.coli) .....	28
<b>Figura 2. 2.</b> Placa de Petri-film con resultados incontables .....	28
<b>Figura 2. 3.</b> Montaje para el proceso de electro-oxidación con ánodo de DDB o de grafito .....	32
<b>Figura 2. 4.</b> Esquema del proceso EO para la eliminación de coliformes en aguas naturales. ....	33
<b>Figura 3. 1.</b> Grafica de probabilidad normal para %ECT, diseño factorial fraccionado. Cd: Conductividad, C: agitación, As: Área sumergida del ánodo, An: tipo de ánodo e i: Densidad de corriente.....	37
<b>Figura 3. 2.</b> Grafica de probabilidad normal para %ECF, diseño factorial fraccionado. Cd: Conductividad, C: agitación, As: Área sumergida del ánodo, An: tipo de ánodo y i: Densidad de corriente.....	38
<b>Figura 3. 3.</b> Diagrama de Pareto para %ECT, Cd: Conductividad, An: tipo de ánodo, i: Densidad de corriente.....	41
<b>Figura 3. 4.</b> Efecto de la densidad de corriente (i) sobre el %ECT.....	42
<b>Figura 3. 5.</b> Efecto de la conductividad (Cd) sobre el %ECT.....	43
<b>Figura 3. 6.</b> Efecto del tipo de ánodo (An) sobre el %ECT. ....	44
<b>Figura 3. 7.</b> Diagrama de Pareto para %ECF, Cd: Conductividad, An: tipo de ánodo e i: Densidad de corriente.....	46
<b>Figura 3. 8.</b> Efecto de la densidad de corriente (i) sobre la variable de respuesta %ECF.....	46



<b>Figura 3. 9.</b> Efecto del factor conductividad (Cd) sobre la variable de respuesta %ECF. ....	47
<b>Figura 3. 10.</b> Efectos principales del factor tipo de ánodo (An) sobre la variable de respuesta %ECF .....	48
<b>Figura 3. 11.</b> Diagrama de superficie de respuesta para %ECT, An=1: ánodo de grafito .....	49
<b>Figura 3. 12.</b> Diagrama de superficie de respuesta para %ECT, An=3: ánodo DDB/Ti.....	49
<b>Figura 3. 13.</b> Diagrama de superficie de respuesta para %ECF, An=1: ánodo de grafito.....	50
<b>Figura 3. 14.</b> Diagrama de superficie de respuesta para %ECF, An=3: ánodo de DDB .....	50
<b>Figura 3. 15.</b> Eliminación de coliformes en el tiempo, bajo las condiciones óptimas: Cd: 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ , $i=10\text{ mA}/\text{cm}^2$ An: grafito o DDB/Ti, $A_s$ : $4\text{cm}^2$ , C: 350 rpm y distancia entre electrodos: 1 cm. ....	52
<b>Figura 3. 16.</b> Ajuste cinético de primer orden, para la eliminación de coliformes, bajo las condiciones óptimas: Cd: $500\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ , $i=10\text{ mA}/\text{cm}^2$ An: grafito o DDB/Ti, $A_s$ : $4\text{cm}^2$ , C: 350 rpm y distancia entre electrodos: 1 cm. ....	53
<b>Figura 4. 1.</b> Diagrama de entradas y salidas del proceso de potabilización (EO). 62	
<b>Figura 4. 2.</b> Diagrama de bloques del proceso de eliminación de coliformes mediante el proceso de EO. ....	63
<b>Figura 4. 3.</b> Diagrama de flujo de proceso de EO. ....	65
<b>Figura 4. 4.</b> Diseño de un tanque con agitación .....	68

## RESUMEN

Este trabajo de investigación se compone de 5 capítulos. El primer capítulo hace referencia a conceptos generales; se presentan el marco teórico y algunos antecedentes referentes al tema de investigación; de la misma manera se plantean los objetivos y el alcance del estudio. El segundo capítulo se compone de la descripción de materiales y métodos utilizados durante el proceso de investigación para el desarrollo de cada uno de los ensayos de laboratorio que se hicieron, teniendo en cuenta el diseño estadístico de experimentos seleccionado. El tercer capítulo está relacionado con el análisis de los resultados, tanto para el diseño de experimentos preliminar, como para el diseño de experimentos de optimización y para el estudio cinético. En el cuarto capítulo se presenta el diseño conceptual del proceso de eliminación de coliformes, bajo las condiciones óptimas de operación para el tratamiento electroquímico evaluado, acompañado de su respectivo análisis económico. En el quinto y último capítulo, se presentan las conclusiones y recomendaciones generales de la investigación.

Este trabajo de investigación consiste en optimizar las condiciones de operación del proceso de electro-oxidación (EO) para la eliminación de coliformes totales y fecales presentes en aguas crudas de efluentes colombianos, usando ánodo de grafito o de diamante dopado con boro (DDB); con el fin de evaluar la eficiencia del tratamiento mediante estudios cinéticos. Para el desarrollo de los experimentos, se utilizó un reactor de acrílico a escala de laboratorio, con 4 mm de espesor, con una capacidad de 80 mL de agua. Las variables de respuesta analizadas durante la investigación fueron: porcentaje de eliminación de coliformes totales (%ECT) y porcentaje de eliminación de coliformes fecales (%ECF). El primer diseño de experimentos desarrollado, fue un diseño factorial fraccionado, cuyo análisis estadístico determinó que los factores de mayor influencia sobre las variables de respuesta estudiadas fueron: Conductividad (Cd:  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), Tipo de ánodo (An) y densidad de corriente ( $i$ :  $\text{mA}/\text{cm}^2$ ). Para determinar las condiciones óptimas de operación del proceso, se utilizó la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) acoplado a un diseño de experimentos Box-Behnken (DBB), cuyo análisis estableció las siguientes condiciones óptimas de operación: Cd (500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), An (DDB y grafito),  $i$  (10  $\text{mA}/\text{cm}^2$ ). Bajo estas condiciones, se realizaron dos estudios cinéticos durante un tiempo de reacción de 30 minutos, uno con ánodo DDB y otro con ánodo de grafito. Se encontró que bajo las condiciones óptimas de operación se tiene un proceso muy eficiente, logrando: 100 %ECT y 100 %ECF en 25 minutos de electrólisis con el electrodo de DDB y 30 minutos con el electrodo de grafito. Con estos resultados, se diseñó conceptualmente una planta de tratamiento de agua para la eliminación de coliformes para procesar 200  $\text{m}^3/\text{día}$  en un reactor de 10,83  $\text{m}^3$ .

**Palabras Clave:** electro-oxidación, eliminación de Coliformes, electrodo de grafito, electrodo de diamante dopado con boro (DDB), optimización estadística.

## 1. CONCEPTOS GENERALES

### RESUMEN

En el siguiente capítulo se presentan los conceptos básicos utilizados para el desarrollo de este proyecto, dentro de los cuales encontramos la definición de agua potable y sus parámetros de calidad en cuanto a propiedades físico-químicas y microbiológicas. Se define el proceso convencional de potabilización, y se hace especial énfasis sobre la desinfección, debido a que es en esta etapa donde se evaluará la eficiencia de la tecnología electroquímica de oxidación anódica, proceso que en esta investigación es presentado como tratamiento alternativo para lograr el cumplimiento de los parámetros microbiológicos del agua potable. Seguido a ello se presentan conceptos básicos de los Procesos Avanzados de Oxidación (PAO's), especialmente los procesos electroquímicos, oxidación anódica. Como guía para el desarrollo del proyecto, se establecen algunos antecedentes relacionados con el tema y finalmente, se plantean los objetivos y el alcance del proyecto, además, de las conclusiones y las diferentes fuentes de información relacionadas con este capítulo.

### 1.1.INTRODUCCIÓN

En el proceso de potabilización de agua para consumo humano se identifica la etapa de desinfección como una de las más importantes para conferir al agua las características que la hacen potable, debido a que en esta etapa se da la remoción de coliformes, virus y posibles patógenos presentes en el agua sin tratar (EPA, office of water, 1999). Mundialmente, un estimado de 2.6 billones de personas no tienen acceso a agua tratada con adecuados procesos de potabilización (Malato *et al.*, 2009). Actualmente, la mayoría de procesos de desinfección se realizan por ozonización o mediante la adición de cloruros. Procesos que involucra la ozonización pueden llegar a tener un costo elevado y aquellos donde hay presencia de compuestos clorados corren el riesgo de ser precursores de compuestos peligrosos como los trihalometanos (THM) y haluros policíclicos (HAP), además de los riesgos posibles por manipulación y almacenamiento (EPA, office of water, 1999).

Como una solución alternativa para los procesos de desinfección de agua convencionales se ha encontrado que los Procesos Avanzados de Oxidación Electroquímicos (PAOE's) han presentado resultados positivos ante la eliminación e inactivación de los virus y microorganismos presentes en el agua. Durante esta investigación, se pretende estudiar la electro-oxidación como tratamiento para la eliminación de coliformes totales y fecales presentes en muestras de aguas crudas, utilizando ánodo de DDB y ánodo de grafito, debido a que estos electrodos han manifestado una alta eficiencia de reacción y otros beneficios en la inactivación y eliminación de coliformes, *E. coli* y virus que contaminan el agua; en especial para el primer tipo de electrodos.

## **1.2.MARCO REFERENCIAL**

### **1.2.1. Agua potable**

Según el decreto 1575 de 2007, se define como agua potable aquella cuyas características físicas, químicas y microbiológicas cumplen con los parámetros establecidos en la resolución 2115 de 2007 y demás normas que los reglamenten, de manera que el agua sea apta para consumo humano (MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL, 2007).

### **1.2.2. Parámetros de calidad para el agua potable**

En cuanto a consideraciones físicas y químicas, las características para evaluar la calidad del agua según los valores establecidos en la norma son:

- Color aparente
- Características organolépticas (Olor y sabor)
- Turbiedad
- Conductividad
- Potencial de hidrógeno (pH)
- Trihalometanos (THMs)
- Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)
- Carbono orgánico total (COT)
- Sustancias con efecto adverso en la salud humana (Nitratos, Nitritos, entre otros)

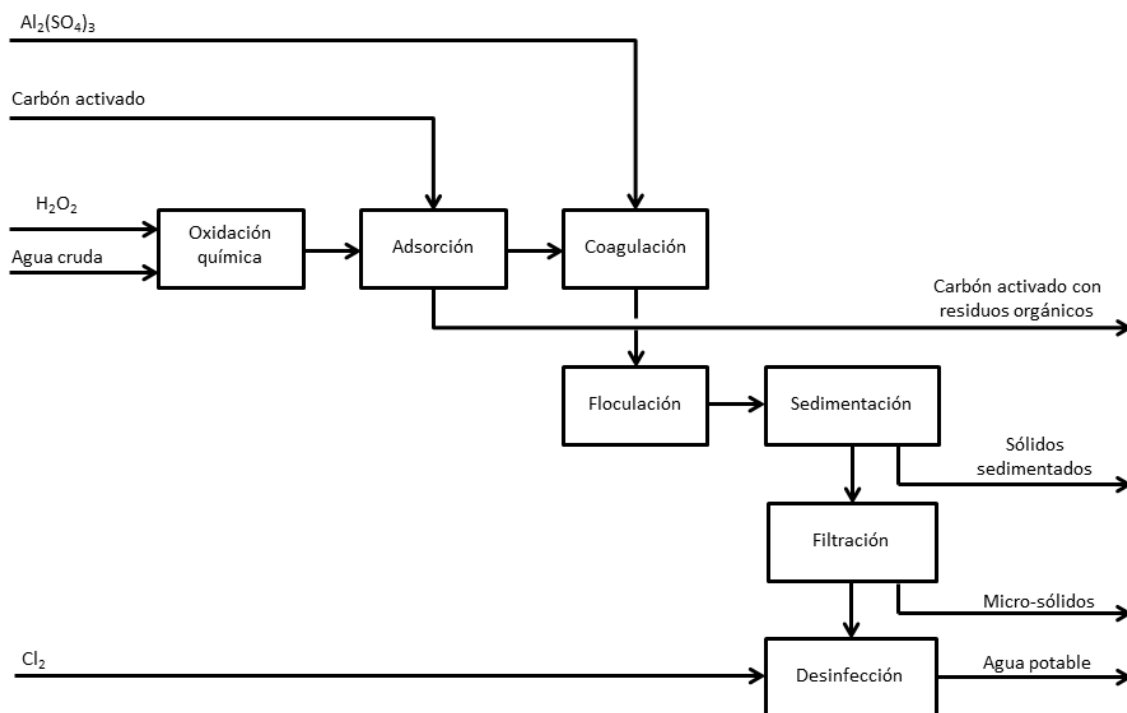
Las características para medir la calidad del agua en relación con el aspecto microbiológico son:

- Coliformes totales
- Coliformes fecales (E-Coli)

(MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2007).

### **1.2.3. Proceso de potabilización de aguas**

En la figura 1.1, se muestra el diagrama representativo de una planta de potabilización de aguas. En el, pueden apreciarse las diferentes etapas de un proceso de potabilización convencional con cloro. Este diagrama ha sido adaptado del proceso de potabilización de EPM.



**Figura 1. 1.** Proceso de potabilización de aguas adaptado del proceso estándar de empresa EPM: (EPM, 2013)

La primera etapa del proceso convencional de potabilización de aguas con cloro es llamada oxidación química. En esta, se utiliza  $H_2O_2$  como agente oxidante para degradar y eliminar los compuestos orgánicos que pueden ser precursores de trihaluometanos. Una vez finalizada esta etapa, se inicia la etapa de adsorción, proceso que puede omitirse o no dependiendo de la carga orgánica del agua. Durante la adsorción, se eliminan compuestos orgánicos que dan olor, sabor y color a las aguas tratadas. En la coagulación, el sulfato de aluminio adicionado ( $Al_2(SO_4)_3$ ) desestabiliza químicamente a las partículas coloidales del agua, con lo que se obtiene su aglomeración. Luego, se inicia una etapa de floculación, mediante un movimiento masivo del agua, se aglomeran las partículas desestabilizadas para formar los flóculos. Una vez se forman los flóculos, se pasa a la etapa de sedimentación, donde los sólidos de un tamaño apreciable se separan por acción de la gravedad. Aquellos sólidos menos densos o de menor tamaño que no fueron separados en la etapa de sedimentación, pasan a través de un filtro y quedan separados del agua. Finalmente, se da la etapa de desinfección, mediante la adición de  $Cl_2$  gaseoso y se eliminan los microorganismos presentes en el agua, concluyendo con el proceso de potabilización (EPM, 2013).

#### 1.2.4. Metodologías para la desinfección

Los microorganismos patógenos y virus presentes en las corrientes de agua para potabilización, de no ser eliminados pueden causar enfermedades tales como fiebre tifoidea, disentería bacteriana, cólera, amibiosis y otras enfermedades de transmisión hídrica

(Guimarães *et al.*, 2001). La inactivación o destrucción de estos se ha realizado mediante diversas metodologías. Estas pueden ser agrupadas en dos categorías: métodos clásicos de desinfección y desinfección mediante PAO's.

Debido a la formación de sub-productos peligrosos (mas de 600 tipos) durante la desinfección de aguas usando metodos convencionales que requieren de reactivos quimicos para eliminar los microorganismos patogenos, es una necesidad inminente la re-evaluación de estas metodologías para esta etapa de la potabilización. Por ello, es apropiado considerar nuevos procesos, como los PAO's, que tengan buen potencial en la desinfección como algunos de los procesos convencionales, que sean competitivos economicamente y sencillos, y que eviten la formación de estos sub-productos, que son en su mayoría cancerígenos y perjudiciales para el ambiente (GilPavas *et al.*, 2014). El cloro en forma de dióxido, iónica, elemental gaseosa, hipoclorosa o amínica, representa junto con la radiación UV, los principales métodos clásicos de desinfección. Por otro lado, entre los PAO's utilizados para desinfección están la ozonización, fotocátalisis heterogénea con UV/TiO<sub>2</sub> y la oxidación electroquímica (Guimarães *et al.*, 2001; Benner *et al.*, 2013; GilPavas *et al.*, 2014).

#### **1.2.5. Los compuestos halogenados como desinfectantes**

Los compuestos halogenados utilizan la oxidación de los compuestos orgánicos como un mecanismo de acción para inactivar los microorganismos presentes en el agua, exhibiendo alta afinidad por los lípidos de las membranas celulares (EPA, office of water, 1999). El uso del cloro como desinfectante presenta ventajas relacionadas con un bajo costo operativo, inactivación efectiva de una amplia gama de microorganismos patógenos, protege el agua de una posterior reinfección y sus efectos residuales son de fácil control (Guimarães *et al.*, 2001); sin embargo, se han presentado efectos adversos relacionados con su utilización, como lo es la formación de ácidos orgánicos halogenados y trihalometanos, los cuales incrementan su velocidad de formación de manera proporcional con el pH y la temperatura (EPA, office of water, 1999; Benner *et al.*, 2013; Doederer *et al.*, 2014; Sigstam *et al.*, 2014)

#### **1.2.6. Electro-oxidación en el proceso de desinfección**

Los PAO's se basan en la generación y uso de especies químicas transitorias, mediante radicales libres, en particular los radicales hidroxilo ( $\cdot\text{OH}$ ) (Oppenländer, 2003). Estos son utilizados generalmente para la eliminación, purificación o remediación, y desinfección de aguas, removiendo químicos, microorganismos y otros contaminantes peligrosos de ella (Oppenländer, 2003; Chapman, 2009).

Entre los PAO's se pueden clasificar los métodos en: tecnologías fotoquímicas (UV/VIS) y no fotoquímicas. En las tecnologías fotoquímicas se encuentran las reacciones foto-oxidativas: oxidaciones foto-inducidas (ej. Foto-ozonización (UV/O<sub>3</sub>)), oxidaciones foto-iniciadas (ej. Vacuum UV) y reacciones de foto-oxigenación ( $^3\text{O}_2$ ) y las reacciones fotocatalíticas: fotocátalisis heterogénea (ej. TiO<sub>2</sub>-O<sub>3</sub>-UV/VIS) y fotocátalisis homogénea (ej. foto-Fenton, ferrioxalato y otros complejos de Fe (III)) (Oppenländer, 2003). Por otro lado, las tecnologías no fotoquímicas presentes actualmente son la ozonización en medio alcalino, O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, reactivo Fenton, oxidación electroquímica, radiólisis  $\gamma$  y procesos con haces de

electrones, plasma no térmico, descarga electrohidráulica – ultrasonido y oxidación en agua sub/y supercrítica (Srinivasan *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2013; Hisaindee *et al.*, 2013).

Los PAO's utilizan la generación de radicales  $\cdot\text{OH}$  para inducir una serie de reacciones en cadena que eliminan microorganismos y degradan contaminantes en el agua. Estos procesos pueden generar los radicales en tres maneras (Bai *et al.*, 2005):

#### **Adhesión de electrones:**



#### **Disociación directa por impacto de electrones:**



#### **Disociación por O (1D) (parte 1):**



#### **Disociación por O (1D) (parte 2):**



El proceso de EO utiliza dos electrodos adecuados, por los cuales se conduce una corriente eléctrica de entre 2-20 A, generando radicales  $\cdot\text{OH}$  o transferencia directa de electrones de manera que se oxide la materia orgánica (Ramírez *et al.*, 2013). Debido a las bajas velocidades de reacción de los electrodos tradicionales y la necesidad de grandes áreas de contacto con estos, los costos de éste proceso pueden ser elevados (Chapman, 2009). Sin embargo, se ha estudiado una solución alternativa a estos inconvenientes. El uso de ánodos de DDB (Ramírez *et al.*, 2013). El amplio uso de éste ánodo, se debe a su sobre potencial de  $\text{O}_2$ , que genera grandes cantidades de radicales  $\cdot\text{OH}$  (Flox *et al.*, 2007). A pesar de lo anterior, se han recomendado variaciones al método EO, aplicando algunos reactivos para mejorar el proceso de degradación. Algunos de los reactivos utilizados son el  $\text{H}_2\text{O}_2$  y iones  $\text{Fe}^{2+}$  (reactivo Fenton), método conocido como electro-Fenton (GilPavas *et al.*, 2009, Griesbach *et al.*, 2010; Cruz-González *et al.*, 2012; García *et al.*, 2013).

#### **Reacción Fenton**



De acuerdo con Ramírez *et al.*, 2013, el proceso de EO con electrodo DDB presenta ventajas en términos de eficiencia, estabilidad y costo de operación frente a otros electrodos y métodos. Además, presenta una alta resistencia a la corrosión incluso en medios fuertemente ácidos y de voltaje elevado. Adicionalmente, los electrodos DDB generan reacciones de oxidación que sin estos no podrían ser ejecutadas en el agua (Griesbach *et al.*, 2010; García *et al.*, 2013; Ramírez *et al.*, 2013).

### 1.3.ALGUNOS ANTECEDENTES

En los últimos años, el mundo ha tenido un gran enfoque en la conservación del agua, lo que ha permitido el descubrimiento de gran variedad de tecnologías para el tratamiento de este recurso, entre las cuales se destacan los PAO's (Nidheesh & Gandhimathi, 2012). Además de ser usados para el tratamiento de aguas residuales, recientemente estas tecnologías también han sido vistas como metodologías alternativas, que puede ser utilizada en la etapa de desinfección del proceso de potabilización del agua. Entre los procesos biológicos y químicos convencionales utilizados para tratamiento de aguas de consumo humano, la cloración ha sido el más utilizado para la eliminación de microorganismos patógenos: coliformes totales y fecales. Sin embargo, se ha demostrado que esta tecnología presenta inconvenientes por diversas causas, entre las que se resalta la generación de sub-productos peligrosos para la salud humana, como los compuestos órgano-clorados (Cano *et al.*, 2012). El costo, la seguridad, el grado de confianza y la conveniencia de operación son factores predominantes en el momento de elegir un proceso de desinfección en particular. Procesos como la filtración por membrana y radiación UV han sido considerados como buenas opciones para una pequeña escala de desinfección de aguas; no obstante, estos tratamientos implican un alto esfuerzo en mantenimiento y costos elevados (Schmalz *et al.*, 2009). Un gran número de investigadores han sugerido que la mayoría de los PAO's son económicamente ineficientes debido principalmente al alto costo de los reactivos químicos necesarios y a la constante radiación UV que algunos de ellos requieren. A pesar de esto, en los últimos años ha existido un interés particular sobre la oxidación anódica, también llamada electro-oxidación, en comparación con otros tratamientos, este proceso presenta muchas ventajas, como la alta eficiencia oxidativa e inactivación de microorganismos, además de no requerir agentes químicos adicionales en el tratamiento (Choia *et al.*, 2010).

La buena capacidad de adaptación, la competencia energética, la susceptibilidad a la automatización y el alto grado de amabilidad con el ambiente, hacen que el proceso de EO sea una alternativa muy prometedora para el tratamiento y potabilización de aguas. Durante investigaciones realizadas se han utilizado diferentes electrodos para este proceso oxidativo; sin embargo, desde hace poco se ha despertado un gran interés por un nuevo tipo de material: electrodos DDB, que han revelado un gran potencial electroquímico (Patel *et al.*, 2013). El proceso de EO con electrodos DDB ha sido estudiado para el tratamiento de variedad de aguas residuales resultantes de diversos procesos industriales. Los científicos Zhu *et al.*, 2009, publicaron los resultados de una investigación en la que evaluaron el efecto de la EO en el tratamiento de aguas residuales de coque. Los tratamientos se realizaron en celdas de un compartimiento con condiciones galvanostáticas a temperatura constante, con agitación magnética y con una separación entre electrodos de 10 mm. Los electrodos utilizados fueron DDB, Ti/SnO<sub>2</sub>-Sb y Ti/SnO<sub>2</sub>-Sb/PbO<sub>2</sub> como ánodo, con una superficie expuesta de 4 cm<sup>2</sup>; y como cátodo acero inoxidable con las mismas dimensiones de superficie. Emplearon una densidad de corriente entre 20-60 mA/cm<sup>2</sup>, pH entre 3-11 y una temperatura entre 20-60 °C. Con los electrodos DDB, se alcanzó la completa mineralización de contaminantes orgánicos. En el año 2010, Zhang *et al.*, evaluaron el proceso de EO para tratar aguas residuales resultantes de la fabricación de fibra acrílica. Mediante un diseño de experimentos factorial determinaron la importancia de las variables de operación: tiempo de tratamiento (1-2h), flujo (400-600 mL/min), intensidad de corriente (0.5-1 A) y concentración inicial de la DQO (362-



723 mg/L). Los ensayos experimentales se efectuaron en celdas de un solo compartimiento, a temperatura constante de 45°C y con una separación entre electrodos de 10 mm. Se trataron 200 mL de efluente por cada ensayo, sin ajuste de pH. Utilizaron dos arreglos de electrodos: Nb/Pt y Nb/DDB como ánodo y cátodo respectivamente. Los resultados obtenidos en el análisis del diseño experimental demostraron la alta efectividad de los electrodos DDB en la degradación de DQO; además, de la disminución del consumo de energía.

Como un beneficio de la eficiencia y con el fin de minimizar los costos de operación del proceso de EO, algunos científicos han planteado el acoplamiento de esta tecnología con tratamientos químicos convencionales. En 2013, Garcia-Morales *et al.*, realizaron una investigación acoplando el proceso EO con la ozonización para el tratamiento de aguas residuales industriales. Con el fin de evaluar el acoplamiento de estas dos tecnologías se utilizaron dos reactores: un reactor electroquímico de geometría cilíndrica, con una capacidad de 1L, conformado por electrodos de DDB con un área superficial de 50 cm<sup>2</sup>; y un reactor de ozonización construido en vidrio, con una capacidad de 1.5L, que fue operado a una temperatura constante de 18°C. Antes de cada tratamiento, el ozono fue alimentado a razón de  $5 \pm 0.5$  mg/L. Los tratamientos fueron realizados sin la modificación de pH y sin la adición de ningún reactivo químico. Luego de 1 hora de tratamiento, se obtuvo una degradación del 99.9% de la DQO, resultados que permitieron concluir que la integración de estos dos procesos, bajo las condiciones evaluadas, fue efectivo y amigable con el ambiente, no solo para el tratamiento de aguas residuales sino también para la potabilización de aguas de consumo humano.

Los buenos resultados de este proceso para el tratamiento de aguas residuales industriales también han sido vistos en procesos de desinfección. Se ha demostrado la eficacia de la electro-desinfección en la eliminación de microorganismos, las especies generadas durante este tratamiento son capaces de oxidarlos, produciendo en primera instancia la lisis de su membrana celular (Cotillas *et al.*, 2013). Variedad de PAO's han sido investigados para la desinfección de aguas, y de la misma manera, en la eliminación de coliformes totales y fecales, parámetros que son considerados como los más importantes en esta etapa de la potabilización. Recientemente, en 2014 GilPavas *et al.*, evaluaron la implementación de foto-reactores de lecho fluidizado, utilizado como bio-polímero alginato de calcio para la inmovilización de TiO<sub>2</sub>, con el fin de evaluar la inactivación de microorganismos y compararla con la fotocatalisis heterogénea tradicional. Bajo las condiciones óptimas de operación encontradas: 0.2 g/L TiO<sub>2</sub>, radiación UV artificial de 310 nm, y una concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> de 30 mg/L, se obtuvo una inhibición total de microorganismos. Sin embargo, este proceso de desinfección se ve limitado debido a factores como: radiación, concentración del catalizador, tiempos de irradiación, entre otros. En 2007 Bergmann *et al.*, realizaron un estudio sobre el uso de electrodos DDB respecto a la formación de sub-productos inorgánicos en la electrolisis para la desinfección de aguas. Los experimentos se efectuaron en una celda electrolítica, conformada por un ánodo rotativo de DDB (300 rpm) y por un cátodo de IrO<sub>2</sub> en Ti, con una distancia entre ellos de 4 mm. El diámetro de los electrodos fue de 35 mm. Con fines comparativos un ánodo de óxido mixto (50%IrO<sub>2</sub>/50%RuO<sub>2</sub>) fue usado en experimentos seleccionados. Fueron tratados volúmenes entre 100-160 mL de aguas con contenidos de sulfato, iones de nitrato, cloruro, cloro y clorato. Emplearon densidades de corriente entre 50 y 300 A/m<sup>2</sup>. Se determinó que el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es uno de los sub-productos

anódicos y catódicos. Los autores detectaron altas concentraciones de cloro activo, las cuales fueron superiores con el uso de electrodos DDB. Debido a la presencia de cloro, existe la posibilidad de formación de mono-cloro-amidas como una reacción secundaria. En 2009 Schmalz *et al.*, realizaron un estudio con el fin de conocer las bases para la desinfección electroquímica de efluentes, utilizando electrodos de DDB. Fue usada una celda electrolítica de 16 cm<sup>3</sup> de capacidad, conformada por dos cátodos de DDB y dos ánodos de DDB con sustrato de niobio, cada uno con un área efectiva de 48 cm<sup>2</sup>. La distancia entre electrodos fue de 3 cm. Se analizaron seis muestras de dos fuentes diferentes de agua, variando la densidad de corriente (2.5-120 mA/cm<sup>2</sup>), la temperatura, la presencia de iones y de la DQO, el pH y el flujo volumétrico. Se observó que la velocidad de inactivación de los microorganismos es directamente proporcional a la densidad de corriente. La inactivación por radicales (principalmente por radicales <sup>•</sup>OH) es despreciable en aguas con presencia de cloruros. La eficiencia de la desinfección aumenta a altas temperaturas y bajo pH's menores a 7.4. En el 2012, Cano *et al.*, realizaron un estudio de electro-desinfección para aguas residuales urbanas, sin adicionar reactivos químicos externos. Fue usada una celda electrolítica de flujo con un solo compartimiento, conformada por dos electrodos de geometría circular con área total de 78 cm<sup>2</sup>: ánodo de DDB y cátodo de acero inoxidable (AISI 304). La distancia entre electrodos fue de 9 mm y el flujo de agua fue de 2.5 dm<sup>3</sup>/min. Para todos los casos se obtuvo una completa eliminación de *E. coli*. Bajo densidades de corriente entre 1.3-13 A/m<sup>2</sup> no hubo formación de ningún sub-producto peligroso (per-cloratos o halo-compuestos). Lopez-Galvez *et al.*, (2012), evaluaron la eficiencia de la electro-desinfección en aguas con las características de lavado de productos orgánicos frescos. Emplearon agua ultra pura con sales inorgánicas, agua del grifo y agua del grifo con NaCl y las inocularon con cinco cepas de *E. coli* (O157:H7) bajo una concentración de 10<sup>5</sup> UFC/mL. Los autores evaluaron dos tipos de celdas electrolíticas: la primera conformada por cátodo y ánodo de DDB con una separación entre ellos de 1 mm, y la segunda conformada por cuatro celdas ubicadas en paralelo, con las mismas características que la primera; utilizando densidades de corriente de 24 y 216 mA/cm<sup>2</sup> respectivamente. El volumen tratado en cada ensayo fue de 5 L. Los autores recomiendan no omitir la adición de cloruros, en su presencia se obtiene una mayor erradicación de microorganismos. A pesar de esto, se demostró el potencial de la desinfección de las aguas tratadas y la reducción de la materia orgánica sin la necesidad de la adición de NaCl. En el 2014 Hussain *et al.*, evaluaron el proceso de desinfección de aguas inoculadas con *E.coli* MS101 (2.5 x 10<sup>8</sup> UFC/mL) y salinizadas con NaCl, mediante el acoplamiento de los procesos de adsorción y EO. Como material adsorbente se usaron escamas de grafito poroso (Nyex<sup>TM</sup>1000). Se utilizó un reactor batch secuencial, con dos compartimientos, uno para cada proceso, separados por una membrana micro-porosa. Fue usado como ánodo una placa de grafito, con un área de 50 cm<sup>2</sup>. Inicialmente, el agua a tratar se mantuvo en contacto con las partículas de grafito durante 30 minutos. Luego de la adsorción, una densidad de corriente de 10 mA/cm<sup>2</sup> fue usada para continuar el tratamiento durante 20 minutos. Bajo las condiciones evaluadas se logró una reducción de *E.coli* mayor al 92.94%. En el 2015 Rajab *et al.*, investigaron la capacidad de los electrodos de DDB en la desinfección para diferentes matrices de agua que contenían variaciones en la cantidad de cloro (0, 20 y 250 mg/L Cl<sup>-</sup>). Fue usado un reactor semi-batch con una capacidad de 45 cm<sup>3</sup>, en el que se dispuso una pila de dos ánodos y dos cátodos de DDB con un área efectiva de 24 cm<sup>2</sup>. El sistema contaba con una recirculación de agua entre 0.5-10 L/min. Se manejaron densidades de corriente de 42 y 167 mA/cm<sup>2</sup> en todos los casos. Se encontró que durante el tratamiento de las aguas con

contenido de cloro hubo generación de  $\text{HClO}$ ,  $\text{ClO}^-$  y posiblemente  $\text{Cl}_2$ . En todos los casos, los resultados indican que a una mayor densidad de corriente se obtiene una desinfección mayor. En el tratamiento de agua sin cloro se logró una inactivación máxima de microorganismos del 90.31% luego de 15 minutos de tratamiento, y usando cloro se lograron inactivaciones mayores al 77.82% luego de 5 minutos de tratamiento.

La revisión bibliográfica realizada nos permitió dar evidencia de que los electrodos DDB pueden tener un gran potencial en la eliminación e inactivación de coliformes totales y fecales presentes en aguas crudas colombianas. De la misma manera, los antecedentes demuestran que los PAO's, entre ellos el proceso EO, son metodologías que presentan gran eficiencia en la erradicación de estos microorganismos, siendo el proceso citado uno de los más "amigables" con el ambiente. Para llevar a cabo este estudio, se realizaron una serie de ensayos preliminares, un diseño de experimentos de tamizado y finalmente, el acoplamiento de la metodología de Superficie de Respuesta (MSR) a un diseño de experimentos de optimización, con el objetivo de determinar las condiciones óptimas de operación del proceso de desinfección, con las cuales se realizó el estudio cinético. Con base en los parámetros establecidos durante el desarrollo de las investigaciones citadas y de la experiencia en el Grupo de investigación GIPAB, se determinaron los parámetros para el desarrollo de esta investigación: el uso de una celda electrolítica mono-polar, empleando dos tipos de ánodos para los ensayos experimentales (grafito y DDB) y un tipo cátodo (titanio); la distancia entre electrodos de 1 cm y el área sumergida de ánodos entre 2-6  $\text{cm}^2$ ; densidad de corriente entre 10-20  $\text{mA/cm}^2$  y agitación entre 250-350 rpm. Por último, con el fin de evitar la formación de compuestos órgano clorados durante los tratamientos electroquímicos se utilizó  $\text{NaSO}_4$  como electrolito para la modificación de la conductividad de las muestras de agua (500-900  $\mu\text{S/cm}$ ).

#### **1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En la mayoría de procesos de potabilización de aguas, generalmente, se utiliza el cloro u otros compuestos halogenados en la etapa de desinfección, con el fin de eliminar o inactivar los microorganismos presentes en el agua cruda, los cuales pueden ser nocivos para la salud humana (EPA, office of water, 1999). A pesar de ser agentes oxidantes efectivos en el tratamiento de aguas, los compuestos halogenados, en presencia de materia orgánica, pueden ser precursores de trihalometanos y otros compuestos órgano-clorados. Estas sustancias pueden llegar ser tóxicas e incluso cancerígenas, generando efectos adversos sobre la salud humana y especies acuáticas de ambientes donde el efluente pueda llevar dichos sub-productos de la reacción (Sigstam *et al.*, 2014). Adicionalmente, el tratamiento de desinfección por cloración representa riesgos por manejo y almacenamiento de materia prima, debido a que se trabaja con gases y compuestos que pueden ser altamente tóxicos y nocivos para la salud de aquellos que los manipulan. Varias tecnologías han sido planteadas como alternativas para solucionar los inconvenientes presentados por las metodologías clásicas de desinfección, entre ellas están los PAO's. Hasta el momento la fotocatalisis heterogénea con  $\text{TiO}_2/\text{UV}$  y la ozonización han sido las más utilizadas para este fin, puesto que otras tecnologías no presentan buena eficiencia y bajos costos de operación. Sin embargo,

recientemente se ha replanteado el proceso de EO, debido al electrodo DDB que presenta muy buenas características de eficiencia, durabilidad y bajo costo operativo.

Por lo tanto, se evaluará el proceso de desinfección de agua para potabilización mediante el proceso EO con ánodo de DDB, de manera que se obtenga el tratamiento idóneo para la eliminación de los microorganismos al menor costo. Se implementará el uso de esta tecnología para el tratamiento de muestras de aguas reales, aguas crudas provenientes de fuentes hídricas colombianas.

## **1.5. OBJETIVOS**

### **1.5.1. Objetivo general**

Evaluar el proceso electroquímico usando ánodo de grafito y/o de diamante dopado con boro (DDB) en la eliminación de coliformes totales y fecales presentes en muestras de agua cruda.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Analizar mediante un diseño de experimentos factorial fraccionado, qué factores: densidad de corriente, conductividad, agitación, área sumergida del ánodo y tipo de ánodo (grafito-DDB), tienen un efecto significativo sobre la eliminación de coliformes totales y fecales en muestras de agua cruda.
- Optimizar el proceso de electro-oxidación para la eliminación de coliformes totales y fecales, usando ánodo de grafito o de diamante, mediante un diseño de experimentos de superficie de respuesta, que permita encontrar las condiciones óptimas de operación del proceso.
- Evaluar la cinética y eficiencia de eliminación de coliformes, bajo las condiciones de operación óptimas encontradas en el análisis estadístico de superficie de respuesta.
- Diseñar conceptualmente el proceso de desinfección de aguas, dentro del proceso de potabilización para una población rural determinada, bajo las condiciones de operación óptimas.
- Evaluar la factibilidad económica del proceso de eliminación de coliformes, con el fin de determinar la rentabilidad de la implementación de los resultados en la desinfección de efluentes.

## **1.6. ALCANCE**

El proyecto tiene como finalidad la evaluación del proceso de eliminación de coliformes totales y fecales mediante EO con ánodo de grafito o DDB. Para lograr el objetivo de la investigación, se efectuará una caracterización inicial de la muestra, determinando la

conductividad, turbidez, pH, carbono orgánico total (COT), demanda química de oxígeno (DQO) y presencia de coliformes totales y fecales.

Las variables de repuesta: porcentaje de eliminación de coliformes totales (%ECT) y porcentaje de eliminación de coliformes fecales (%ECF), nos permitirán conocer la eficiencia de cada tratamiento electroquímico en el proceso de desinfección. Para cada tratamiento, se evaluarán factores como: densidad de corriente ( $i$ ), conductividad ( $Cd$ ), agitación (RPM), área sumergida del ánodo y tipo de ánodo, que nos permiten determinar los factores de mayor influencia sobre la eliminación de coliformes, y de esta manera, poder encontrar las condiciones óptimas de operación mediante la MSR acoplada a un DBB.

Al terminar el proyecto, se entregará un informe con los resultados obtenidos y su respectivo análisis estadístico, donde se dará a conocer mediante métodos gráficos las condiciones óptimas de operación del proceso de desinfección, además del diseño conceptual con el PFD (process flow diagram) del proceso de potabilización, especificaciones de la celda electroquímica y un análisis económico del proceso.

## **1.7. CONCLUSIONES**

A partir de la información suministrada en este capítulo, se entiende que los PAO's son definitivamente una alternativa eficiente para el tratamiento de aguas y representan una gran cantidad de ventajas ambientales y económicas en comparación con los métodos convencionales. Especialmente, el proceso EO con el uso de electrodos de DDB implica unas ventajas mayores, debido a que este tipo de electrodo aporta un incremento favorable en la eficiencia del proceso electroquímico por su alta capacidad de generar radicales  $\cdot OH$ , en comparación con otros tipos de electrodos.

Las variables más relevantes para el proceso EO, específicamente para la eliminación de material orgánico como lo son los coliformes totales y fecales son: la densidad de corriente, área sumergida del electrodo (ánodo), la agitación (RPM), la conductividad, Voltaje y Amperaje. También es indispensable conocer de forma clara la caracterización inicial de las muestras con el fin de poder determinar si se ha llegado a los valores establecidos por reglamentación del agua potable una vez realizado el tratamiento electroquímico.

## **1.8. REFERENCIAS**

Bai, M., Bai, X., Zhang, Z., Bai, M., & Yang, B. (2005). Treatment of Red Tide in Ocean Using Non-Thermal Plasma Based Advanced Oxidation Technology. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 25, (5), 539-550.

Benner, J., Helbling, D. E., Kohler, H.-P. E., Wittebol, J., Kaiser, E., Prasse, C., Ternes, T. A., Albers, C. N., Aamand, J., Horemans, B., Springael, D., Walravens, E., Boon, N. (2013). Is biological treatment a viable alternative for micropollutant removal in drinking water treatment processes? *Water research*, 47, (16), 5955-5976.

Bergmann, H. M., & Rollin, J. (2007). Product and by-product formation in laboratory studies on disinfection electrolysis of water using boron-doped diamond anodes. *Catalysis Today*, 124, (3-4), 198-203.

Cano, A., Cañizares, P., Barrera-Díaz, C., Sáez, C., & Rodrigo, M. A. (2012). Use of conductive-diamond electrochemical-oxidation for the disinfection of several actual treated wastewaters. *Chemical engineering journal*, 211-212, 463-469.

Chapman, T. W. (2009). Treatment of complex systems advanced oxidation processes. *Water Purification and Management*, 1, 147-169. Oviedo: Springer in cooperation with NATO Public Diplomacy Division.

Choia, J. Y., Leea, Y.-J., Shin, J., & Yang, J.-W. (2010). Anodic oxidation of 1,4-dioxane on boron-doped diamond electrodes for wastewater treatment. *J. of Hazardus Materials*, 179, (1-3), 762-768.

Cotillas, S., Llanos, J., Cañizares, P., Mateo, S., & Rodrigo, M. A. (2013). Optimization of an integrated electrodisinfection/electrocoagulation process with Al bipolar electrodes for urban wastewater reclamation. *Water research*, 47, (5), 1741-1750.

Cruz-González, K., Torres-Lopez, O., García-León, A. M., Brillas, E., Hernández-Ramírez, A., & Peralta-Hernández, J. M. (2012). Optimization of electro-Fenton/BDD process for decolorization of a model azo dye wastewater by means of response surface methodology. *Desalination*, 286, 63-68.

Doederer, K., Gernjak, W., Weinberg, H. S., & Farré, M. J. (2014). Factors affecting the formation of disinfection by-products during chlorination and chloramination of secondary effluent for the production of high quality recycled water. *Water research*, 48, 218-228.

EPA, office of water. (1999). *Combined Sewer Overflow, Technology Fact Sheet. Chlorine Disinfection*. Washington, D.C.: United States Environmental Protection Agency.

EPM. (2013, 12 13). *Plantas de agua EPM*. Retrieved 12 15, 2013, from EPM: <http://www.epm.com.co/site/home/institucional/nuestrasplantas/agua.aspx>

Flox, C., Cabot, P.-L., Centellas, F., Garrido, J. A., Rodríguez, R. M., Arias, C., Brillas, E. (2007). Solar photoelectro-Fenton degradation of cresols using a flow reactor with a boron-doped diamond anode. *Applied catalysis B: Environmental*, 75, (1-2), 17-28.

García-Moralesl, M., Roa-Morales, G., Barrera-Díaz, C., Bilyeu, B., & Rodrigo, M. (2013). Synergy of electrochemical oxidation using boron-doped diamond (BDD) electrodes and ozone (O<sub>3</sub>) in industrial wastewater treatment. *electrochemistry communications*, 27, 34-37.

García, O., Isarain-Chávez, E., Garcia-Segura, S., Brillas, E., & Peralta-Hernández, J. M. (2013). Degradation of 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid by Electro-oxidation and electroFenton/BDD Processes Using a Pre-pilot Plant. *Electrocatalysis*, 4, (4), 224-234.

GilPavas, E., Betancourt A., Ángulo M., Dobrosz-Gómez I, Gómez-García M.A. (2009). "The Box-Behnken experimental design for the optimization of the electrocatalytic treatment

of wastewaters with high concentration of phenol and organic matter". *Water Sc. and Techn.*, 60, 11, 2809–2817.

GilPavas, E. H., Casas, D., & Rojas, V. (2013). *Procesos avanzados de oxidación para el tratamiento de residuos líquidos peligrosos procedentes de los laboratorios de Ingeniería de Procesos*. Medellín: Universidad EAFIT. Cuadernos de investigación, (88).

GilPavas, E. H., Acevedo, J., López, L. F., & Dobrosz-Gómez, I. (2014). Solar and artificial UV inactivation of bacterial microbes by Ca-alginate immobilized TiO<sub>2</sub> assisted by H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> using fluidized bed photoreactors. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 17, (2).

Griesbach, U., Malkowsky, I. M., & Waldvogel, S. R. (2010). Green Electroorganic Synthesis Using BDD Electrodes. In C. Comninellis, & G. Chen, *Electrochemistry for the environment*, 1, 125-141. New York: Springer.

Guimarães, J. R., Ibáñez, J., Litter, M. I., & Pizarro, R. (2001). Desinfección de aguas. *Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogenea*, 35, (4), 305-316. Buenos Aires: CYTED.

Hisaindee, S., Meetani, M., & Rauf, M. (2013). Application of LC-MS to the analysis of advanced oxidation process (AOP) degradation of dye products and reaction mechanisms. *Analytical chemistry*, 49, 31-44.

Hussain, S. N., de las Heras, N., Asghar, H., & Brown, N. (2014). Disinfection of water by adsorption combined with electrochemical treatment. *Water Research*, (54), 170-178.

López-Gálves, F., Posada-Izquierdo, G. D., Selma, M. V., Pérez-Rodríguez, F., Gobet, J., Gil, M. I., & Allende, A. (2012). Electrochemical disinfection: An efficient treatment to inactivate *Escherichia coli* O157:H7 in process wash water containing organic matter. *Food microbiology*, 30, (1), 146-156.

Malato, S., Fernandez-Ibáñez, P., Maldonado, M., Blanco, J., & Gernjak, W. (2009). Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: Recent overview and trends. *Catalysis Today*, 147, (1), 1-59.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. (2007). *Resolución 2115*. República de Colombia.

MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL. (2007). *Decreto 1575*. República de Colombia.

Nidheesh, P., & Gandhimathi, R. (2012). Trends in electro-Fenton process for water and wastewater treatment: An overview. *Desalination*, 299, 1-15.

Oppenländer, T. (2003). *Photochemical Purification of Water and Air*. Federal Republic of Germany: WILEY-VCH.

Patel, P. S., Bandrea, N., Sarafa, A., & Ruparelia, J. P. (2013). Electro-catalytic Materials (Electrode Materials) in Electrochemical Wastewater Treatment. *Procedia engineering*, 51, 430-435.

Rajab, M., Heim, C., Letzel, T., Drewes, J., & Helmreich, B. (2015). Electrochemical disinfection using boron-doped diamond electrode – The synergetic effects of in situ ozone and free chlorine generation. *Chemosphere*, (121), 47-53.

Ramírez, C., Saldaña, A., Hernández, B., Acero, R., Guerra, R., Garcia-Segura, S., Brillas, E., Peralta-Hernandez, J. M. (2013). Electrochemical oxidation of methyl orange azo dye at pilot flow plant using BDD technology. *J. of Ind. and Eng. Chemistry*, 19, (2), 571-579.

Schmalz, V., Dittmar, T., Haaken, D., & Worch, E. (2009). Electrochemical disinfection of biologically treated wastewater from small treatment systems by using boron-doped diamond (BDD) electrodes – Contribution for direct reuse of domestic wastewater. *Water Research*, 43, (20), 5260-5266.

Sigstam, T., Rohatschek, A., Zhong, Q., Brennecke, M., & Kohn, T. (2014). On the cause of the tailing phenomenon during virus disinfection by chlorine dioxide. *Water research*, 48, 82-89.

Srinivasan, S. V., Mary, G. P., Kalyanaraman, C., Sureshkumar, P. S., Balakameswari, K. S., Suthanthararajan, R., Ravindranath, E. (2012). Combined advanced oxidation and biological treatment of tannery effluent. *Clean Techn Environ Policy*, 14, (2), 251-256.

Zhang, C., Wangb, J., Zhou, H., Fua, D., & Gua, Z. (2010). Anodic treatment of acrylic fiber manufacturing wastewater with boron-doped diamond electrode: A statistical approach. *Chemical engineering journal*, 161, (1-2), 93-98.

Zhu, X., Ni, J., & Lai, P. (2009). Advanced treatment of biologically pretreated coking wastewater by electrochemical oxidation using boron-doped diamond electrodes. *water research*, 43, (17), 4347-4355.



## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **RESUMEN**

El siguiente capítulo presenta cada una de las etapas efectuadas en el proceso de investigación. Se dan a conocer el montaje experimental utilizado y el procedimiento de los experimentos realizados, desde la etapa preliminar hasta la etapa de optimización del proceso estudiado. De la misma manera, se presentan con detalle los equipos, materiales y reactivos utilizados, así como las características del agua usada para la potabilización. Los métodos estadísticos utilizados para esta etapa fueron: factorial fraccionado como diseño preliminar y la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) acoplado a un diseño de experimentos Box-Behnken (DBB) con el objetivo de determinar las condiciones óptimas de operación para la eliminación de coliformes, bajo las cuales se realizaron estudios cinéticos.

### **2.1.MATERIALES Y EQUIPOS**

#### **2.1.1. Reactivos**

Con el fin de evitar la formación de compuestos órgano-clorados, la adecuación de la conductividad de la muestra de agua se realizó con la adición de Sulfato de sodio ( $\text{NaSO}_4$ ), con una pureza del 99% (grado analítico, MERCK S.A.). Las diluciones de las muestras de agua antes y después de los tratamientos electroquímicos se realizaron en un medio nutritivo estéril de agua peptonada, que fue preparado con la adición de 25 g/L de agua destilada, de peptona de carne por digestión pancreatina, granulada para microbiología (MERCK S.A.). Para la caracterización microbiológica de las muestras se usaron placas Petrifil<sup>TM</sup> (recuento de E. coli/ Coliformes, EC, 3M Health Care Ltd.) La demanda química de oxígeno (DQO) fue medida con el kit test 0-26 (DQO 160, Macherey-Nagel). La medición del carbono orgánico total (COT) se realizó con el kit test 0-94 (COT 60, Macherey-Nagel). La medición de nitratos ( $\text{NO}_3$ ) fue realizada con el kit test 0-65 (Nitrate 8, Macherey-Nagel) y la medición nitritos ( $\text{NO}_2$ ) con el kit test 0-68 (Nitrit 2, Macherey-Nagel).

#### **2.1.2. Reactor**

Se utilizó un reactor tipo batch de acrílico con 4 mm de espesor, con dimensiones de ancho, largo y profundidad de 4.8x6x5.5 cm y capacidad de 80 mL. El proceso de oxidación anódica se realizó utilizando ánodos de grafito poroso (Carbón cristalino compacto con hibridación  $\text{Sp}^2$ ) y DDB (1 mm sustrato de titanio, marca Fraunhofer USA center for Coatings and Laser Applications), con dimensiones de 0.98x5x0.5 cm y de 1.5x5x0.2 cm respectivamente; y cátodos de titanio (99% de pureza) y DDB (0.5 mm sustrato de silicio, marca Fraunhofer USA center for Coatings and Laser Applications), con dimensiones de 1.2x5x0.15 cm y 1.5x5x0.5 cm respectivamente; este último utilizado solo en algunos experimentos (puntos centrales del diseño de tamizado). Se realizó un arreglo mono-polar, dos electrodos, ánodo y cátodo, separados a una distancia de 1 cm, fueron sumergidos en el agua a tratar y

alimentados por una fuente de voltaje BK-Precisión (salida de corriente directa, con una capacidad voltaica entre 0-30 V y un amperaje entre 0-5 A). Todos los experimentos se efectuaron en el laboratorio de biotecnología de la universidad EAFIT, en una cámara de seguridad biológica modelo FLV 100V (que usa flujo laminar y que protege al operador, a la muestra y al ambiente) para evitar cualquier contaminación del medio, bajo condiciones de temperatura y presión ambiente. Los experimentos se mantuvieron con agitación constante, usando agitadores magnéticos (Corning®).

### 2.1.3. Caracterización de la muestra

Para el desarrollo de la investigación se utilizó agua natural tomada de la quebrada “la presidenta”, ubicada en el barrio Patio bonito de la ciudad de Medellín – Colombia. La muestra de agua se tomó de un tramo de la quebrada que atraviesa el sector del metro de la estación “Poblado”. Esta se tomó con un balde y fue embazada en un recipiente de plástico hasta llegar al laboratorio de biotecnología de la universidad EAFIT, donde posteriormente fue vertida y almacenada en erlenmeyers. Durante el desarrollo de cada diseño de experimentos (DOE) y de las cinéticas, se utilizaron diferentes lotes de agua, debido a que las propiedades microbiológicas de la muestra (Coliformes totales (CT) y fecales (CF)), cambian significativamente de un día a otro. Cabe Aclarar que cada diseño experimental se llevó a cabo en un día (con una duración total aproximada de 8 horas por diseño), el mismo día en que la muestra de agua fue tomada, y bajo una concentración inicial de coliformes constante. De la misma manera, el estudio cinético y sus respectivas mediciones fisicoquímicas y microbiológicas se realizaron el mismo día en que se tomó la muestra de agua. En la Tabla 2.1, se presenta la caracterización inicial para la muestra de agua utilizada en la investigación. La caracterización de la muestra se realizó en términos de las propiedades físico-químicas y microbiológicas que son de especial interés con respecto a la calidad de agua potable (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007).

**Tabla 2. 1.**Caracterización inicial del agua utilizada en la investigación

<b>Parámetros Fisicoquímicos y microbiológicos</b>	<b>Valor</b>
pH	6.6-8.37
Conductividad (μS/cm)	268-408
Solidos totales (g/mL)	0.0018-0.0037
Turbidez (NTU)	5-11
DQO (mg/L)	46.5-60.5
COT (mg/L)	16-18
Nitratos (mg/L NO <sub>3</sub> )	0.870
Nitritos (mg/L NO <sub>2</sub> )	0.183
CT (UFC/mL)	6750-20800
CF (UFC/mL)	2833-7090

Los ensayos experimentales se desarrollaron sin la modificación de ningún parámetro físico-químico a excepción de la conductividad. En el caso de contar con muestras de agua con un pH más ácido o más básico, podría tenerse un tratamiento electroquímico más eficiente o menos eficiente, según sea el caso respectivamente. Un pH menor, contribuye con una reacción de evolución de oxígeno más eficaz.

#### 2.1.4. Métodos analíticos

Para determinar la concentración de coliformes totales (coliformes y *E.coli*) y fecales (*E. coli*) en las muestras de agua analizadas antes y después de los tratamientos electroquímicos, se utilizó la técnica de Petri-film, basándonos en el método 147.1993 validado por la NMKL, que requiere una incubación de los microorganismos a una temperatura de  $37 \pm 1$  °C y un tiempo de 24 h para Coliformes y 48 h para E.Coli (3M Microbiology., 2003). Durante la caracterización de las muestras y para los estudios cinéticos, la medición de la demanda química de oxígeno (DQO) se realizó siguiendo el método estándar 5220D (Standard Methods, 2005). La medición del carbono orgánico total (COT) se hizo siguiendo el método estándar 5310D (Standard Methods, 2005). La medición de nitratos ( $\text{NO}_3$ ) fue realizada siguiendo el método estándar 4500B (Standard Methods, 2005). La medición de nitritos ( $\text{NO}_2$ ) se hizo siguiendo el método estándar 4500B (Standard Methods, 2005). Para la medición del pH y conductividad se usó el pH-metro (Orion Star A111), marca Thermo SCIENTIFIC y el conductímetro (Orion 5 Star), respectivamente. La eficiencia del proceso EO en la desinfección de las aguas tratadas fue determinada con el caculo del %ECT y del %ECF, mediante la ecuación 2.1:

$$\%P = \frac{P_n - P}{P_0} * 100 \quad (2.1)$$

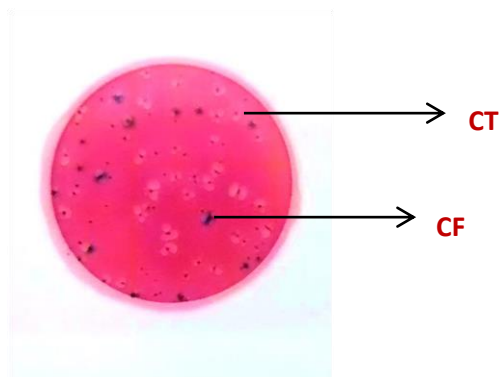
Dónde:

$P_0$ : Parámetro inicial a evaluar (ECF ó ECT)

P: Parámetro final a evaluar (ECF ó ECT)

##### 2.1.4.1. Conteo de coliformes totales y fecales

La AOAC INTERNACIONAL (Association of Analytical Communities) define a los coliformes como bacilos Gram negativos que producen ácido y gas a partir de lactosa durante la fermentación metabólica (3M Microbiology., 2003). El conteo de coliformes totales (CT) y fecales (CF) es utilizado para evaluar la efectividad del proceso EO en la etapa de desinfección de la potabilización del agua. La técnica de Petri-film, permite el conteo de unidades formadoras de colonias (UFC) mediante la siembra de 1 mL de agua (UFC/mL) en una película de agar sangre (Bilis Rojo Violeta) selectiva (Placas 3M Petrifilm™) que permite el crecimiento de coliformes y *E.coli*. La lectura según el método 147.1993 validado por la NMKL establece que en las placas Petrifilm los coliformes se muestran como colonias rojas con gas; y *E.coli* se muestra como colonias azules con gas. La producción de un precipitado color azul por parte de las colonias de coliformes fecales se da mediante la reacción de la  $\beta$ -glucoronidasa (una enzima producida por estas bacterias) y un indicador de la actividad de esta enzima presente en la placa (3M Microbiology, 2003).



**Figura 2. 1.** Placa Petri-film con CT y CF (Coliformes y *E.coli*)

En la figura 2.1 puede observarse la manera en que lucen los CT y CF en las placas de Petri-film 3M<sup>TM</sup>. Esta es una placa con resultados contables, donde es posible visualizar con claridad el número de colonias de *E.Coli* por mL y el número de colonias de coliformes por mL, teniendo como guía el método de conteo citado. En la placa se observan las colonias activas (productoras de gas) que deben ser contadas para la estimación de UFC/mL de CT (puntos rojos con burbuja) y CF (puntos azules con burbuja) de la muestra de agua analizada. El conteo de las colonias bacterianas se efectúa usando lupa y luz. Si los resultados son incontables (alta población de microorganismos, más de 250 colonias en una placa) deben realizarse diluciones de la muestra en agua peptonada estéril, que permitan el conteo (1/100, 1/1000) (3M Microbiology, 2003).



**Figura 2. 2.**Placa de Petri-film con resultados incontables

En la figura 2.2 puede observarse la manera en que luce una placa con resultados incontables. Debido a la alta población de microorganismos no es posible hacer una correcta lectura en la placa, con lo que la estimación de UFC/mL de CT y CF no puede efectuarse. Una población superior a la mostrada en la figura podría dar como resultado una placa totalmente morada o azul, dependiendo de si hay mayoría de CT o por el contrario de CF.

## 2.1.5. Métodos estadísticos

### 2.1.5.1. Diseño factorial fraccionado $2^{k-1}$

Cuando el número de factores a analizar dentro de un diseño de experimentos preliminar es mayor a 2, es útil el desarrollo de un diseño factorial fraccionado (DFF), que en otros términos equivale a la mitad de un diseño factorial completo. Lo descrito anteriormente, convierte a este tipo de diseño en una alternativa que permite reducir de manera estratégica el número de ensayos experimentales con una pérdida mínima de información valiosa; por ello, se considera a este tipo de diseño como un diseño eficiente (tiempo) y “amigable” económicamente. El diseño de tamizado seleccionado, permite la determinación de factores que tienen una influencia significativa sobre la variable de respuesta analizada, debido a la jerarquización de los efectos (Montgomery, 2001; de la Vara & Gutiérrez, 2012).

En esta investigación se usó como diseño preliminar, un DFF  $2^{5-1}$  con tres puntos centrales, con lo que se obtuvo un total de 19 ensayos experimentales. Los ensayos en los puntos centrales fueron agregados con el fin de tener un mejor estimativo del error durante el cálculo estadístico, y con ello obtener resultados más confiables de las variables de respuesta estudiadas (%ECT y %ECF). Al finalizar los ensayos, los resultados fueron analizados utilizando el software estadístico STHATGRAPHICS Centurion XVI, mediante herramientas como el análisis de la varianza (ANOVA), diagrama de Pareto y diagrama de superficie de respuesta para establecer los factores más significativos. La calidad del ajuste del modelo y la capacidad de predicción se expresó mediante el coeficiente de determinación  $R^2$ . En la Tabla 2.2, se muestran los factores evaluados y los niveles de cada factor para la creación y desarrollo del diseño experimental:

**Tabla 2. 2.** Factores estudiados y niveles de cada factor en el DOE factorial fraccionado  $2^{5-1}$

Variable	Nivel Mínimo	Nivel central	Nivel Máximo
Densidad de corriente (i, mA/cm <sup>2</sup> )	5	10	15
Conductividad (Cd, μS/cm)	600	750	900
Agitación (AG, RPM)	250	300	350
Tipo de Ánodo (An)	1	2	3
Área sumergida del ánodo (As, cm <sup>2</sup> )	4	5	6

Para la variable tipo de ánodo: 1: hace referencia a ánodo de grafito; 2: arreglo con ánodo de DDB con sustrato de titanio y cátodo de DDB con sustrato de silicio; y 3: ánodo de DDB con sustrato de titanio. Para los niveles 1 y 3 se trabajó con cátodo de titanio.

En la tabla 2.3, se presenta el diseño de experimentos preliminar realizado teniendo en cuenta los factores y niveles de cada factor establecidos:

**Tabla 2. 3.** Diseño de experimentos factorial fraccionado  $2^{5-1}$  con tres puntos centrales

Ensayo	i (mA/cm <sup>2</sup> )	Cd (μS/cm)	AG (rpm)	An	As (cm <sup>2</sup> )
1	5	900	250	3	6
2	5	600	350	3	6
3	15	900	350	3	6
4	5	900	250	1	4
5	15	600	350	1	6
6	15	600	350	3	4
7	5	600	250	1	6
8	10	750	300	2	5
9	10	750	300	2	5
10	10	750	300	2	5
11	15	900	250	1	6
12	5	600	250	3	4
13	5	900	350	3	4
14	5	600	350	1	4
15	15	900	350	1	4
16	15	600	250	3	6
17	5	900	350	1	6
18	15	900	250	3	4
19	15	600	250	1	4

### 2.1.5.2. Diseño de experimentos de superficie de respuesta, Box-Behnken.

La MSR es una estrategia experimental y de análisis que permite dar solución al problema de encontrar las condiciones óptimas de operación de un proceso estudiado, que en ocasiones ha sido previamente analizado mediante otro tipo de diseño menos complejo (como factoriales o factoriales fraccionadas). Las condiciones de operación encontradas influyen de manera directa en las características de calidad de dicho proceso. El diseño de superficie DBB, es un diseño de segundo orden, es decir un tipo de diseño que permite ajustar un modelo de segundo orden para lograr evaluar, además de efectos lineales y de interacción, aquellos efectos que son cuadráticos (de curvatura pura), con el fin de encontrar el punto óptimo que se encuentra dentro de una región experimental estudiada. El DBB se utiliza cuando se tienen tres o más factores y cuando se requiere eficiencia en cuanto al número de ensayos experimentales (de la Vara & Gutiérrez, 2012). Este diseño sirve para optimizar las condiciones de operación del proceso de desinfección mediante EO, con las tres variables más importantes que fueron establecidas previamente en el diseño preliminar. En la Tabla 2.4 se puede observar los factores y niveles de cada factor seleccionados para el DBB, mientras se dejan constantes durante la experimentación los factores poco significativos, en este caso, la agitación y el área sumergida del ánodo, con valores de 4 cm<sup>2</sup> y 350 rpm, respectivamente (GilPavas *et al.*, 2012, GilPavas *et al.*, 2014 ).

**Tabla 2. 4.** Factores estudiados y niveles de cada factor en el DBB

Variable	Nivel Mínimo	Nivel central	Nivel Máximo
Densidad de corriente ( $i$ , mA/cm <sup>2</sup> )	2	11	20
Conductividad (Cd, $\mu$ S/cm)	500	700	900
Tipo de Ánodo (An)	1	2	3

En la tabla 2.5 se muestra la matriz del DDB desarrollado a partir de los resultados obtenidos en el diseño de tamizado:

**Tabla 2. 5.** Diseño de experimentos de optimización Box-Behnken

Ensayo	$i$ (mA/cm <sup>2</sup> )	Cd ( $\mu$ S/cm)	An
1	11	500	3
2	11	700	2
3	20	700	3
4	20	900	2
5	2	700	3
6	20	700	1
7	11	500	1
8	20	500	2
9	2	700	1
10	2	900	2
11	11	900	1
12	11	900	3
13	11	700	2
14	11	700	2
15	2	500	2

## 2.2.MONTAJE E IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DE ELECTRO-OXIDACIÓN

Para el proceso de desinfección mediante EO, se utilizó un reactor de acrílico con una capacidad de 80 mL. Con el fin de mantener una homogeneidad del medio y para promover las reacciones electroquímicas se tuvo una agitación constante. Para esto, el reactor fue dispuesto en una plancha con agitación magnética. Se realizó un arreglo monopolar con un ánodo y un cátodo, los cuales fueron sumergidos en el agua a tratar y conectados a una fuente de voltaje. La distancia manejada entre los electrodos fue de 1 cm. En la figura 2.3, se muestra el montaje del proceso EO.



**Figura 2. 3.** Montaje para el proceso de electro-oxidación con ánodo de DDB o de grafito

En la figura 2.3, se observan tubos falcón con agua peptonada, usada para la dilución de las muestras; pipetas volumétricas y otros de los materiales utilizados para la siembra de las muestras tratadas y sin tratar. Todos los materiales e implementos utilizados fueron previamente esterilizados. Los ensayos se realizaron a presión y temperatura ambiente del laboratorio.

#### **2.2.1. Cinéticas de degradación:**

Con el desarrollo del diseño de optimización, se establecen los parámetros óptimos para el proceso EO y se procede con el estudio cinético, con el fin de evaluar la eficiencia del tratamiento en la eliminación de CT y CF.

### **2.3.PROCEDIMIENTO**

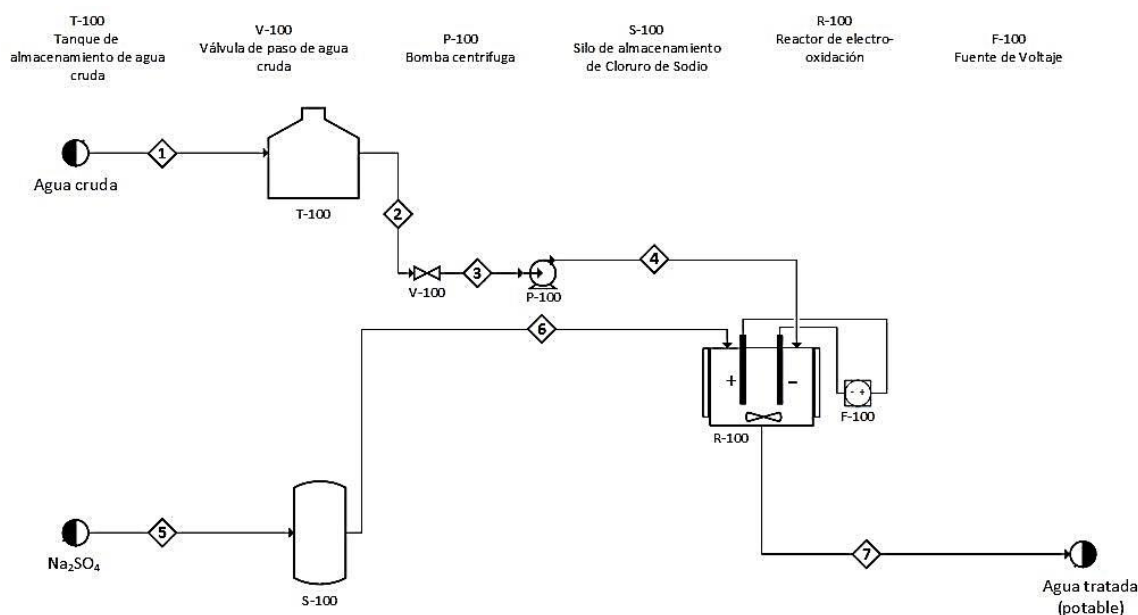
Definidos los factores y niveles de estudio para el proceso de eliminación de coliformes (electro-desinfección), se creó un primer diseño de experimentos, factorial fraccionado. Para la realización de cada uno de los ensayos experimentales se tuvieron en cuenta diferentes aspectos: la cantidad de sólidos suspendidos o en dispersión en la muestra a tratar puede intervenir de manera significativa en el desencadenamiento de las reacciones electroquímicas, por lo cual, para dar inicio a los tratamientos, se dejaron decantar los sólidos del agua tomada de la quebrada (luego estos se retiraron de la muestra), con el fin de tener un tratamiento electroquímico más eficiente. El agua “limpia” fue dispuesta en erlenmeyers, tapados con algodón para permitir la respiración de la muestra, y posteriormente fue puesta bajo una agitación de 120 rpm en el “cuarto de cultivos” del laboratorio de biotecnología, que es una habitación con una temperatura ambiente de 30°C; esto con el fin de simular las condiciones de la fuente de agua natural y evitar la muerte de microorganismos por un efecto diferente al del tratamiento de EO. Una primera siembra de agua se hizo con el fin de verificar la presencia de microorganismos antes de proceder con el desarrollo de los ensayos. Una vez verificada la presencia de coliformes en la muestra se dio inicio a los experimentos. Para cada ensayo se tomaron 80 mL de muestra de agua en agitación, se modificó la conductividad y luego, se dio inicio al tratamiento bajo los parámetros establecidos en el diseño experimental.



Después de 8 minutos de tratamiento se tomó una muestra del agua tratada y se hizo la respectiva siembra para su caracterización microbiológica (sin dilución, con dilución 1/100 y 1/1000). El tiempo total para el desarrollo del primer diseño de experimentos fue de 7 horas (todos realizados el mismo día). Durante cada hora (Desde el inicio de los tratamientos hasta el final) se hicieron controles microbiológicos del agua sin tratar, con el fin de verificar la población de coliformes de la muestra en el tiempo, logrando de esta manera obtener variables de respuesta (%ECT y %ECF) con un mayor grado de confiabilidad frente a las posibles variaciones de la población de microorganismos por efectos diferentes al del tratamiento electroquímico.

Con base en los resultados obtenidos en el diseño de experimentos preliminar, se estableció el DBB. Se siguió el mismo procedimiento descrito en el diseño preliminar. El tiempo total en la ejecución de todos los experimentos de optimización fue de 5 horas y media (todos realizados en el mismo día). Con el fin de evitar variables de repuesta erróneas, el agua sin tratar fue monitoreada cada hora para verificar la población de coliformes en el tiempo.

Bajo las condiciones óptimas de operación determinadas mediante el análisis estadístico del diseño de optimización, se realizaron dos estudios cinéticos: uno utilizando ánodo de grafito y en el otro ánodo de DDB. Para cada estudio cinético se tomó muestra del agua tratada en tiempos de 0, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos, las cuales fueron inmediatamente sembradas en las placas de Petri-film. En todos los experimentos realizados (DFF, DBB y estudios cinéticos) el cátodo se sumergió a la misma distancia que el ánodo y la distancia entre los electrodos, 1 cm. La figura 2.4, presenta un esquema del montaje de EO utilizado.



**Figura 2. 4.** Esquema del proceso EO para la eliminación de coliformes en aguas naturales.

\*Nota: la desinfección es la última etapa en el proceso de potabilización de aguas.

## 2.4.CONCLUSIONES

Cuando no se tiene suficiente información sobre un proceso y este requiere investigarse a fondo, es importante antes de desarrollar un diseño de optimización un diseño preliminar. La importancia de un diseño factorial fraccionado radica en que este permite encontrar de manera analítica entre varios factores de estudio cuales son los que tienen una influencia significativa sobre las variables de respuesta para el proceso que está siendo evaluado. Además, es un diseño de experimentos que disminuye costos, en comparación con un factorial completo, se reduce el número de ensayos y por tanto, el tiempo y demás recursos requeridos. Son de gran importancia los factores significativos determinados como primera instancia en este tipo de diseño de experimentos, debido a que son variables que pueden utilizarse para un nuevo diseño, que ayude a optimizar las condiciones de operación del proceso. En el caso de seleccionar la MSR acoplado a un DBB, deberán seleccionarse dos o tres factores significativos, mientras los otros factores evaluados persisten de manera constante. Encontrar las condiciones óptimas de operación de un proceso, permiten realizar estudios cinéticos, que ayudan a determinar la eficiencia del proceso y el tiempo necesario para alcanzar de manera satisfactoria el objetivo de evaluación.

## 2.5.REFERENCIAS

3M Microbiology. (2003). Manual: Guía de Interpretación, Placas para recuento de aerobios. St.Paul., Estados Unidos.

De la Vara, R., & Gutiérrez, H. (2012). *ANÁLISIS Y DISEÑO DE EXPERIMENTOS*. México: McGraw-Hill, 2da Edición.

GilPavas, E., Dobrosz-Gómez, I., Gómez-García, M.Á. (2012). Decolorization and mineralization of Diarylide Yellow 12 (PY12) by photo-Fenton process: the Response Surface Methodology as the optimization tool. *Water Sci. and Techn.*, 65, (10), 1795-1800.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. (2007). *Resolución 2115*. República de Colombia.

Montgomery Douglas C. Design and Analysis of Experiments (2001). John Wiley & Sons, Inc. Estados Unidos de América. 8th Edition.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (2005). 20th Edition. Centennial edition. Washington: American Public Health Association (APHA).

### 3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

#### RESUMEN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la investigación; diseño de experimentos preliminar, diseño de experimentos de optimización y los estudios cinéticos. El análisis de los resultados del diseño de experimentos preliminar, permitió definir los factores significativos en la eliminación de coliformes totales y fecales durante el proceso de electro-desinfección, a partir de los cuales fue creado un diseño estadístico de optimización Box-Behnken, con el objetivo de determinar las condiciones óptimas de operación del proceso: Cd (500 uS/cm), An (DDB/Ti y grafito/Ti), i (10 mA/cm<sup>2</sup>). Bajo estas condiciones se efectuaron estudios cinéticos del proceso, para los cuales se obtuvo una reducción del 100% de CT y CF luego de 25 y 30 minutos de tratamiento, usando ánodo de DDB/Ti y de grafito/Ti respectivamente; resultados que indican que el proceso de electro-desinfección es altamente eficiente. El agua libre de coliformes fue almacenada con el fin de realizar un análisis de recrecimiento bacteriano. Luego de 15 días de almacenamiento del agua tratada, no hubo recrecimiento de coliformes.

#### 3.1. DISEÑO DE EXPERIMENTOS DE TAMIZADO

##### 3.1.1. Resultados

La tabla 3.1 presenta los resultados obtenidos para cada uno de los 19 ensayos programados, de acuerdo al diseño de experimentos factorial fraccionado 2<sup>5-1</sup>. En el intervalo experimental evaluado, se observa que para las variables respuesta: %ECF y %ECT, se alcanza una eliminación entre el 15.29% y el 99.98%, y entre 0.46% y 99.88%, de coliformes fecales y totales respectivamente. Una revisión preliminar de los datos muestra que las mayores eficiencias del proceso se obtienen bajo el efecto de mayores densidades de corriente, sin embargo, a continuación se usan herramientas estadísticas, como el diagrama de distribución normal, para conocer la magnitud del efecto de las variables evaluadas sobre la eliminación de los coliformes.

**Tabla 3. 1.** Resultados diseño de experimentos factorial fraccionado 2<sup>5-1</sup>.

Ensayo	i (mA/cm <sup>2</sup> )	Cd (uS/cm)	RPM	An*	As (cm <sup>2</sup> )	%ECF	%ECT
1	5	900	250	3	6	29.41	17.05
2	5	600	350	3	6	99.61	98.86
3	15	900	350	3	6	99.70	99.00
4	5	900	250	1	4	50.59	0.46
5	15	600	350	1	6	99.98	99.88
6	15	600	350	3	4	99.52	99.18
7	5	600	250	1	6	64.71	44.70
8	10	750	300	2	5	99.65	99.17

9	10	750	300	2	5	99.61	99.16
10	10	750	300	2	5	99.72	99.12
11	15	900	250	1	6	57.65	30.88
12	5	600	250	3	4	22.35	22.58
13	5	900	350	3	4	15.29	8.06
14	5	600	350	1	4	99.01	98.27
15	15	900	350	1	4	43.53	19.82
16	15	600	250	3	6	99.89	99.70
17	5	900	350	1	6	50.59	18.43
18	15	900	250	3	4	99.86	99.79
19	15	600	250	1	4	99.75	99.31

\* 1: Grafito-Ti, 2: DDB/Ti-DDB/Si, 3:DDB/Ti-Ti

El tiempo de electrólisis para cada uno de los tratamientos fue de 8 minutos y la distancia entre electrodos de 1 cm. Los ensayos 8, 9 y 10 son los puntos centrales del diseño experimental. En ellos se observan variables de respuesta similares, que oscilan entre 99.65-99.72 para coliformes fecales y entre 99.12-99.17 para coliformes totales. En un diseño de experimentos, los puntos centrales son conformados por el valor intermedio entre el nivel máximo (mayor valor) y el nivel mínimo (menor valor) de cada factor. Debido a esto, la similitud en las variables de respuesta obtenidas para estos tres ensayos se considera como un resultado acertado, que contribuye con la generación de un análisis estadístico confiable del diseño experimental.

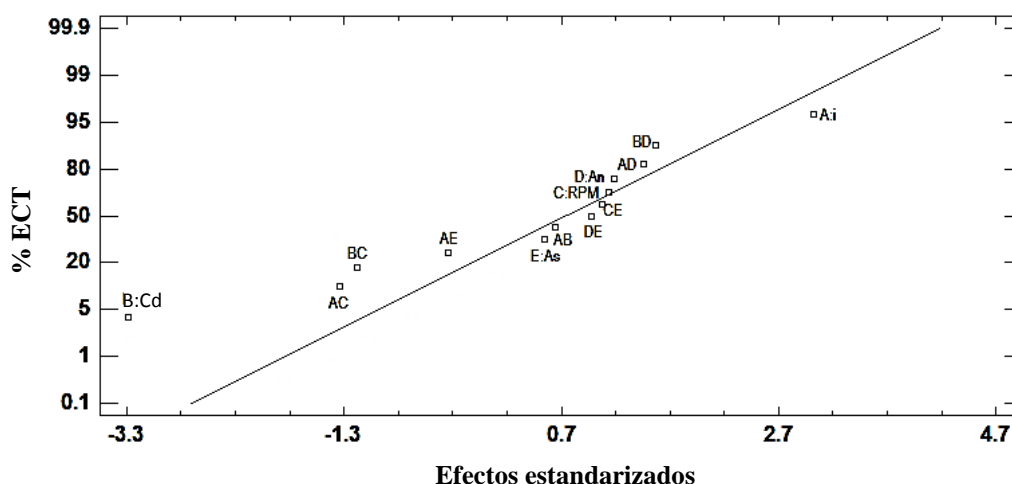
En la tabla 3.1, también se puede observar que en general, a menor densidad de corriente (5 mA/cm<sup>2</sup>), se obtiene menor porcentaje de eliminación de coliformes; mientras que a mayor densidad de corriente (15 mA/cm<sup>2</sup>) se obtienen porcentajes más altos de eliminación. En un proceso electroquímico, la oxidación del agua (o reacción de evolución del oxígeno) se da debido al desencadenamiento de una serie de reacciones químicas que originan su disociación (Hellman *et al.*, 2015). Una disociación efectiva del agua promueve la generación de <sup>•</sup>OH, principal especie que causa la lisis de la membrana celular de los coliformes en el proceso de electro-desinfección. Numerosos estudios (Flox *et al.*, 2005; Zhu *et al.*, 2009; Murugananthan *et al.*, 2010), han demostrado que a altas densidades de corriente se obtiene un incremento en las velocidades de degradación de materia orgánica, fenómeno que es atribuido a la mayor generación de especies oxidativas (<sup>•</sup>OH, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, entre otras) sobre la superficie de los electrodos cuando se incrementa el valor de dicho factor (Särkkä *et al.*, 2015).

Además, puede apreciarse que a conductividades bajas y manteniendo una densidad de corriente específica, el %ECT y %ECF es mayor. Más adelante, y con base en los análisis experimentales que se van presentando se explicara dicho fenómeno. Una visión global de los resultados del diseño preliminar expuestos en la tabla 3.1, permite observar que a mayores velocidades de agitación son obtenidos mayores porcentajes de eliminación; sin embargo, puede pensarse que predominan los efectos de la conductividad y de la densidad de corriente. Las reacciones electroquímicas en el proceso de oxidación anódica tienen lugar en la superficie del ánodo (Hellman *et al.*, 2015), por lo que se concidera que el tipo de anodo es

un parametro importante, y se debe tener en cuenta cual es el mejor en el proceso evaluado, para lograr una desinfección eficiente y efectiva. Los resultados para este estudio preliminar respecto al tipo de ánodo, muestran altas eliminaciones tanto con el uso de electrodo de grafito como con el uso de electrodo DDB/Ti, con valores máximos de eliminación de: 99.89 %ECF (ensayo 16) y 99.79%ECT (ensayo 18) para electrodo de DDB (An=3); y de 99.98 %ECF (ensayo 5) y 99.88 %ECT (ensayo 5) para electrodo de grafito (An=1). Respecto al área sumergida del ánodo, fueron obtenidos altos porcentajes de ECT y ECF (>99%) para los casos de 4, 5 y 6 cm<sup>2</sup> sumergidos de ánodo de grafito y de DDB/Ti (ver ensayos 5, 18 y puntos centrales; tabla 3.1).

### 3.1.1.1. Efectos estandarizados para %ECT

Una de las herramientas estadísticas útiles en el análisis del diseño de experimentos factorial fraccionado es la gráfica de probabilidad normal o grafico de Daniel, que permite apreciar la distribución de los factores de estudio, y los efectos estandarizados de dichos factores y de las interacciones entre factores. La figura 3.1, presenta la gráfica de probabilidad normal realizada mediante el software STHATGRAPHICS Centurion para el análisis de la variable de respuesta %ECT.



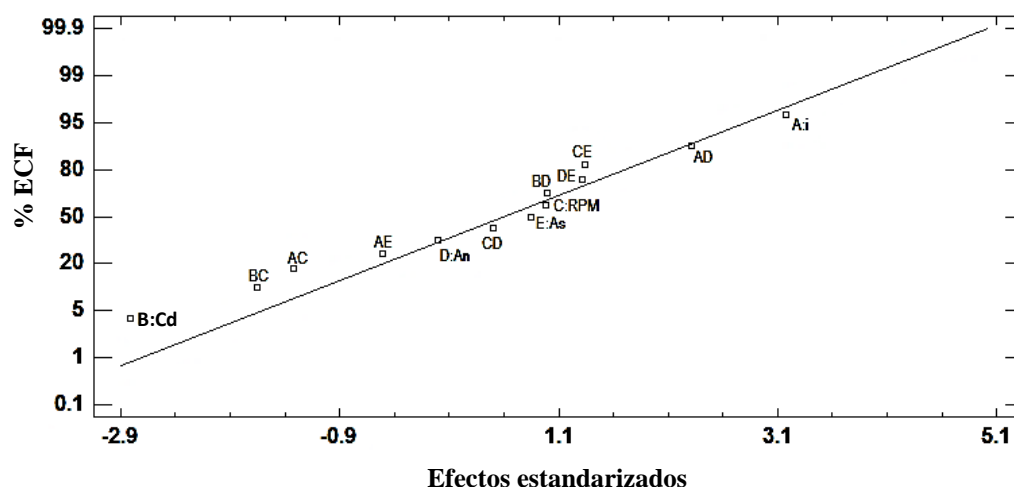
**Figura 3. 1.** Grafica de probabilidad normal para %ECT, diseño factorial fraccionado. Cd: Conductividad, C: agitación, As: Área sumergida del ánodo, An: tipo de ánodo e i: Densidad de corriente.

La figura 3.1, es una gráfica compuesta por una línea de distribución normal y puntos dispersos a su alrededor, que representan los efectos de los factores y de sus interacciones. Los factores e interacciones de factores más cercanos a la línea tienen un efecto menor sobre la variable de respuesta analizada, mientras que los más alejados tienen un efecto mayor o significativo (GilPavas *et al.*, 2015; de la Vara & Gutiérrez, 2012). En esta figura puede observarse que dos de los factores de estudio: conductividad (B=Cd) y densidad de corriente (A=i), son los más alejados de la línea, es decir, son los factores que tienen un efecto de mayor significancia en la eliminación de coliformes totales bajo las condiciones de tratamiento establecidos en el diseño experimental. Los factores tipo de ánodo, área

sumergida y agitación se encuentran muy cerca de la línea de distribución normal, y por lo tanto tienen un efecto menor, siendo este último factor el del efecto más despreciable.

### 3.1.1.2. Efectos estandarizados para %ECF

La figura 3.2, presenta la gráfica de probabilidad normal para el análisis de la variable de respuesta %ECF. Para este caso se tiene una mayor cercanía de todos los factores a la línea de 45° en comparación con el análisis para %ECT.



**Figura 3. 2.**Gráfica de probabilidad normal para %ECF, diseño factorial fraccionado. Cd: Conductividad, C: agitación, As: Área sumergida del ánodo, An: tipo de ánodo y i: Densidad de corriente.

En la figura 3.2, se puede observar que la conductividad y la densidad de corriente son los factores más alejados de la línea de distribución normal, factores cuyo efecto significativo es mayor en la eliminación de coliformes fecales, de acuerdo a los ensayos experimentales, donde predomina el efecto de la conductividad.

Con base en los resultados obtenidos del análisis experimental preliminar, se determinó que los factores que afectan significativamente la eficiencia del proceso electro-químico son: densidad de corriente, conductividad y tipo de ánodo. Para el diseño de experimentos de optimización se empleó una densidad de corriente entre 2 a 20 mA/cm<sup>2</sup> y una conductividad entre 500 a 900  $\mu$ S/cm; los niveles para el factor tipo de ánodo se mantuvieron. El intervalo de experimentación para el factor densidad de corriente se modificó, pasando de 5-15 mA/cm<sup>2</sup> a 2-20 mA/cm<sup>2</sup>, debido a que, como se observa en la tabla 3.1, bajo la menor densidad de corriente empleada (5 mA/cm<sup>2</sup>) fueron obtenidos %ECT y %ECF mayores al 98%, por lo cual se decidió experimentar una densidad de corriente menor (2 mA/cm<sup>2</sup>), que implica menor gasto energético y menores costos de operación. Además, empleando la mayor densidad de corriente (15 mA/cm<sup>2</sup>) se obtuvieron %ECT y %ECF mayores al 99.8%, resultados que proponen considerar el uso de una mayor densidad de corriente en el diseño de experimentos de optimización (20 mA/cm<sup>2</sup>) con el fin de evaluar si el incremento de este factor causa un efecto mayor sobre las variables de respuesta. En el caso de la conductividad, se encontró una relación inversamente proporcional con las variables de respuesta, por lo tanto, se decidió disminuir el nivel inferior del factor hasta 500  $\mu$ S/cm.

### 3.2. DISEÑO DE EXPERIMENTOS DE OPTIMIZACIÓN

#### 3.2.1. Resultados

De acuerdo con los resultados obtenidos en el diseño de experimentos preliminar, se procede con la siguiente etapa de investigación, la determinación de las condiciones óptimas de operación. La tabla 3.2 presenta los resultados obtenidos de los 15 ensayos experimentales programados para el diseño de experimentos de superficie de respuesta tipo Box-Behnken. Los resultados expuestos en la tabla 3.2 muestran que en el intervalo experimental seleccionado se tienen %ECT entre 23.08 - 93.99 y %ECF entre 25.95 - 95.77.

**Tabla 3. 2.** Resultados diseño de experimentos Box-Behnken\*

Ensayo	i (mA/cm <sup>2</sup> )	Cd (μS/cm)	An	%ECT	%ECF
1	11	500	3	82.93	85.90
2	11	700	2	23.10	45.70
3	20	700	3	73.80	85.19
4	20	900	2	56.73	71.79
5	2	700	3	86.06	89.42
6	20	700	1	93.03	95.77
7	11	500	1	90.38	89.42
8	20	500	2	88.70	88.01
9	2	700	1	84.38	82.37
10	2	900	2	27.88	25.95
11	11	900	1	91.35	89.42
12	11	900	3	93.99	90.83
13	11	700	2	27.88	43.58
14	11	700	2	23.08	47.11
15	2	500	2	57.93	63.33

\* Tiempo electrólisis: 8 min, distancia electrodos 1 cm, As: 4 cm<sup>2</sup> y RPM: 350

Los ensayos experimentales 2, 13 y 14 son los puntos centrales del diseño experimental. Los %ECT y %ECF para estos tres ensayos, oscilan entre 23.08-27.88 para %ECT y 43.58-47.11 para %ECF. La baja variación de los resultados para estos puntos centrales, indica que se tiene una alta reproducibilidad de los ensayos del diseño experimental.

Se observa que se mantiene la relación de proporcionalidad directa entre el factor densidad de corriente y las variables de respuesta. Los mayores %EC han sido obtenidos a las densidades de corriente más altas, 11 y 20 mA/cm<sup>2</sup>. El máximo %ECT se obtuvo a la densidad de corriente de 11 mA/cm<sup>2</sup> (ensayo 12), mientras que el máximo %ECF se logró a la densidad de corriente de 20 mA/cm<sup>2</sup> (ensayo 6). Lo anterior se puede explicar debido a que algunas de las cepas de *E. coli* presentes en el agua cruda, en comparación con las cepas de otros coliformes, presentan una resistencia mayor a procesos de desinfección oxidativos (Lisle *et al.*, 1998). Se observa que en general, que bajo una misma densidad de corriente, que la conductividad tiene un efecto inversamente proporcional sobre las variables de

respuesta. Respecto al tipo de ánodo, se lograron obtener altos %ECT y %ECF utilizando tanto ánodo de grafito como de DDB.

### 3.2.2. Análisis estadístico de %ECT

#### 3.2.2.1. Tabla ANOVA

El análisis de la varianza (ANOVA) es la técnica central en el análisis de datos experimentales. La tabla 3.3 presenta el análisis de resultados del DBB para el %ECT. El valor P, definido como el factor que determina la significancia observada (de la Vara & Gutiérrez, 2012), indica que los efectos de curvatura pura (cuadráticos) de la conductividad y el tipo de ánodo son los únicos significativos sobre el %ECT.

**Tabla 3. 3.** ANOVA para %ECT, diseño Box-Behnken

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A:i	392.14	1	392.14	2.2	0.1815
B:Cd	312.375	1	312.375	1.75	0.2271
C:An	62.4962	1	62.4962	0.35	0.5723
AA	712.621	1	712.621	4	0.0856
AC	109.307	1	109.307	0.61	0.4592
BB	1366.45	1	1366.45	7.67	0.0277
CC	7726.54	1	7726.54	43.37	0.0003
Total error	1247.2	7	178.172		
Total (corr.)	11087.3	14			
R <sup>2</sup> = 88.75					
R <sup>2</sup> <sub>adj</sub> =77.50					

El valor de confianza seleccionado para este diseño de experimentos es del 95%, de manera que los factores e interacciones de factores que presenten valores  $P \leq 0.05$  (1-0.95) tienen un efecto significativo sobre la variable de respuesta. Para el %ECT, las interacciones cuadráticas de la conductividad y el tipo de ánodo tienen un valor  $P < 0.05$ .

El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para el modelo matemático de optimización de la variable de respuesta %ECT fue de 88.75%. Lo anterior indica que un 11.25% de la variabilidad de los datos no puede ser explicada por el modelo, representado en la ec. 3.3:

$$\%ECT = 470.198 - 1.83369*i - 0.704556*Cd - 179.386*An + 0.171512*i^2 - 0.580833*i*An + 0.000480937*Cd^2 + 45.745*An^2 \quad (3.3)$$

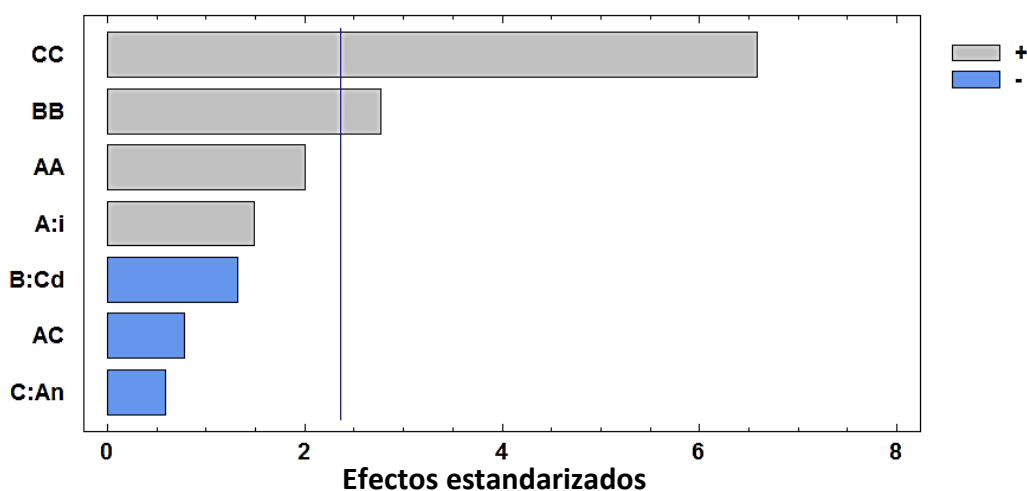
En este modelo, los cambios en los valores de las variables  $Cd^2$  y  $An^2$  son los que generarían un mayor impacto en los resultados de la variable de respuesta. Por otra parte, el coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{adj}$ ) tiene en cuenta el tamaño del conjunto de datos (n) y los grados de libertad del diseño experimental; por ello, este coeficiente es preferido cuando el tamaño de n es grande con el fin de evitar un incremento artificial del  $R^2$ . En general, para



términos de predicción, se recomienda  $R^2_{adj} > \text{al } 70\%$  (de la Vara & Gutiérrez, 2012), razón por la cual se considera que el  $R^2_{adj}$  obtenido para este diseño experimental es considerablemente bueno, un 77.5% de la variabilidad de los datos puede ser predicha bajo el modelo cuadrático seleccionado.

### 3.2.2.2. Diagrama de Pareto

Una herramienta estadística que permite la apreciación gráfica del análisis del diseño experimental es el diagrama de Pareto. La figura 3.3 presenta el diagrama de Pareto para el % ECT de acuerdo a los datos experimentales registrados:

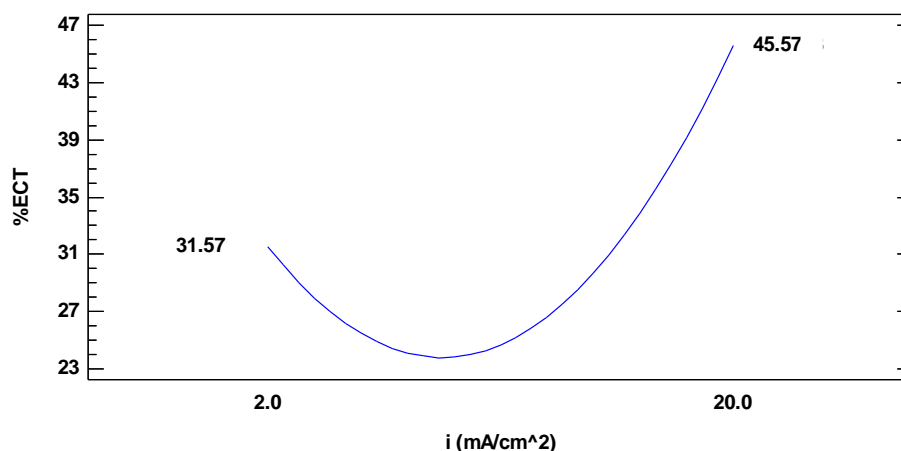


**Figura 3.3.** Diagrama de Pareto para %ECT, Cd: Conductividad, An: tipo de ánodo, i: Densidad de corriente.

Este diagrama está compuesto por una serie de barras horizontales, que representan el efecto de cada uno de los factores de estudio, y de las interacciones de los factores; y una línea vertical, llamada línea de significancia. Los factores o interacciones de los factores que cruzan la línea de significancia tienen un efecto trascendental sobre la variable de respuesta analizada con un 95% de confianza. Las barras verticales se presentan en orden de significancia, iniciando por el factor o interacción de factores que genera el mayor efecto y terminando en el que genera menor efecto. Si el signo de las barras es positivo (barras grises) el efecto es directamente proporcional y si es negativo (barras azules) es inversamente proporcional (de la Vara & Gutiérrez, 2012). Como se observa en la figura 3.3, la interacción cuadrática tipo de ánodo e interacción cuadrática conductividad tienen un efecto significativo y son directamente proporcional e inversamente proporcional al %ECT, respectivamente.

### 3.2.2.3. Efecto de la densidad de corriente

La figura 3.4 presenta el efecto de la densidad de corriente sobre el %ECT. Se observa que a mayores densidades de corriente se obtienen un mayor %ECT.

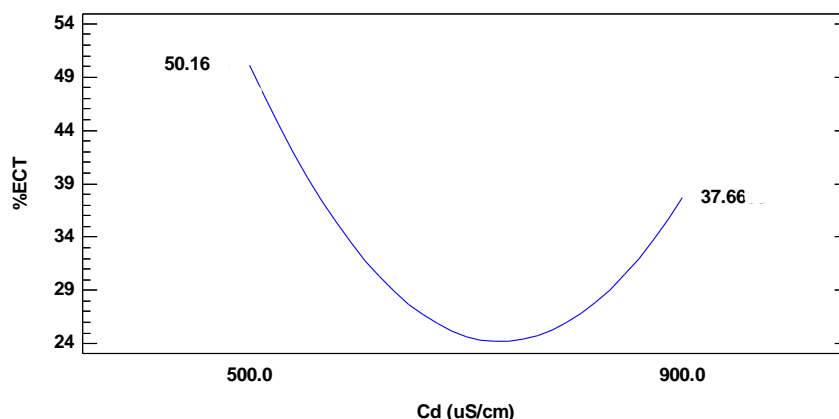


**Figura 3. 4.** Efecto de la densidad de corriente ( $i$ ) sobre el %ECT.

En la figura 3.4, se observa que para el intervalo entre 2 y 13 mA/cm<sup>2</sup>, el %ECT es bajo, pero cuando el factor  $i$  pasa el límite superior del intervalo mencionado, el %ECT aumenta de manera proporcional. Los resultados obtenidos indican que la eficiencia del proceso es mayor al incrementar la  $i$ . Esto es debido a que a mayor  $i$  se promueve la generación de radicales  $\cdot\text{OH}$  y de otras especies oxidativas ( $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ , entre otras) (Hellman *et al.*, 2015). Dichas especies inducen un cambio morfológico en las células de los coliformes de manera indirecta, que conlleva a la muerte celular. En 2006 Jeong *et al.*, realizaron un estudio para determinar el cambio morfológico celular de *E. Coli* causado por el tratamiento de oxidación anódica usando electrodo DDB. Los investigadores notaron que antes del proceso electroquímico de desinfección las bacterias activas eran células sanas, la pared celular, donde se encuentra la membrana externa, y la membrana interna (citoplasmática), estaban intactas. Después del tratamiento de electro desinfección, Jeong *et al.*, observaron como la pared celular sufrió drásticos cambios, al igual que la naturaleza de los contenidos de la célula (su interior). El análisis morfológico desarrollado permitió determinar que durante el tratamiento electroquímico, la pared celular de las bacterias se rasga, se da la lisis de la membrana celular externa y posteriormente la lisis de la membrana citoplasmática, lo cual es debido a la oxidación de los lípidos, proteínas y demás sustancias que las conforman. El interior de la célula se vacía, el contenido intracelular sale al exterior en el momento en que se da la lisis de las membranas y finalmente es oxidado por acción de las especies generadas durante el tratamiento, principalmente por la acción de radicales  $\cdot\text{OH}$ . Autores como Schmalz *et al.*, y Rajab *et al.*, en los años 2009 y 2015 respectivamente, encontraron un comportamiento similar al que se ha presentado durante el desarrollo de esta investigación para la eliminación de coliformes totales y fecales, donde afirmaron que la  $i$  es directamente proporcional a la inactivación de los microorganismos.

#### 3.2.2.4. Efecto de la conductividad

En la figura 3.6 se presenta el efecto de la Cd sobre el %ECT. Inicialmente, puede apreciarse que existe una relación de proporcionalidad inversa entre %ECT y la Cd, se observa que predomina un mayor %ECT a menores valores de conductividad.



**Figura 3. 5.**Efecto de la conductividad (Cd) sobre el %ECT.

La figura 3.5 muestra que en general para intervalo entre 700 y 900  $\mu\text{S/cm}$ , los valores de %ECT son menores que para el intervalo comprendido entre 500 y 700  $\mu\text{S/cm}$ . Lo anterior indica que para el proceso evaluado no son requeridas altas concentraciones de  $\text{NaSO}_4$  en el medio, es decir, no se requiere de altas conductividades ( $> 700 \mu\text{S/cm}$ ) para lograr una desinfección óptima. En el 2006, Flox *et al.*, encontraron que el incremento de  $\text{NaSO}_4$  en el medio no acelera el proceso de mineralización (degradación de la materia orgánica hasta  $\text{CO}_2$ ), se guarda una relación de proporcionalidad inversa entre la concentración de  $\text{NaSO}_4$  y la oxidación de la materia orgánica. Altas concentraciones de  $\text{NaSO}_4$  en el medio ocasionan una generación más lenta de los radicales  $\cdot\text{OH}$  debido a la rápida producción de  $\text{O}_2$  y de otros oxidantes débiles como el  $\text{O}_3$ , el ion peróxido-di-sulfato ( $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ ) y  $\text{H}_2\text{O}_2$ :



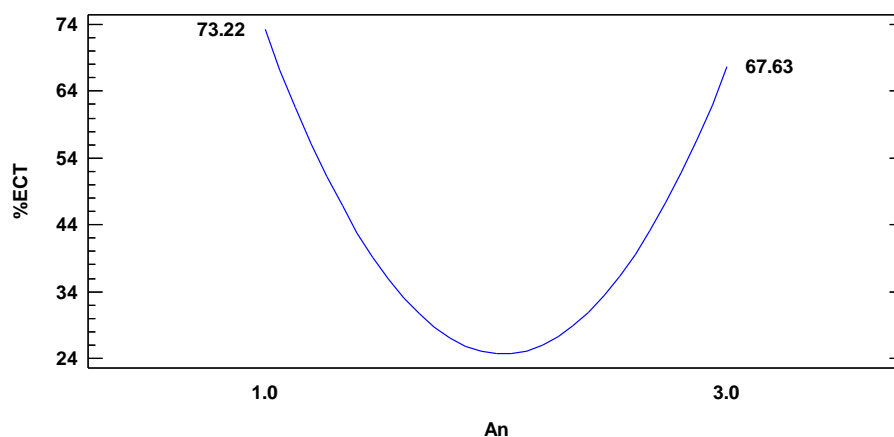
Además, parte de los radicales  $\cdot\text{OH}$  producidos durante el proceso electro-químico se desperdician a causa de la acción de las especies producidas en dichas reacciones competitivas y poco oxidativas (ecuaciones 3.4-3.6), la oxidación de los radicales hasta  $\text{O}_2$  o su recombinación para dar  $\text{H}_2\text{O}_2$  (Flox *et al.*, 2006).

Otros estudios han utilizado bajas concentraciones de  $\text{NaSO}_4$ , para favorecer el crecimiento celular en medios de cultivo específicos (Smith & Parkinson, 1980). De acuerdo a esto, una alta concentración de  $\text{NaSO}_4$  en el medio, además de servir como conductor, sirva como nutriente, ayudando a las bacterias a presentar una mayor resistencia a la oxidación anódica; es decir, altas concentraciones de dicho electrolito pueden ocasionar una menor reducción de coliformes durante el tratamiento de electro-desinfección, como se ha visto en este estudio.

La relación de proporcionalidad inversa entre la Cd y los %ECT y %ECF, utilizando NaSO<sub>4</sub> como electrolito, se considera un resultado a favor del tratamiento EO, la norma Colombiana para la regulación de la calidad del agua de consumo humano establece que “El valor máximo aceptable para la conductividad en el agua potable debe ser hasta 1000  $\mu$ S/cm” (MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2007).

### 3.2.2.5. Efecto del tipo de ánodo

La figura 3.6 muestra los efectos principales del factor tipo de ánodo. Para este estudio se trabajó con dos tipos de ánodo (grafito y DDB/Ti) y tres arreglos de electrodos: grafito-Ti (An=1), DDB/Ti-DDB/Si (An=2), DDB/Ti-Ti (An=3). En primera instancia se observa que tanto con el uso de electrodo de grafito y de DDB/Ti se obtienen altos %ECT.



**Figura 3. 6.**Efecto del tipo de ánodo (An) sobre el %ECT.

En la figura 3.6 se observa que el electrodo de grafito presenta un incremento del 7.6 % ECT con respecto al electrodo de DDB/Ti, resultados que concuerdan con la información obtenida en la literatura especializada. A pesar de esto, el proceso de electro-desinfección con el uso del DDB puede ser mejor, en términos de eficiencia, estabilidad y costo de operación (Ramírez *et al.*, 2013). En la figura 3.6 también puede observarse que se tiene un proceso mas eficiente cuando se usa catodo de titanio en vez de catodo DDB/Si, lo cual indica que el electrodo de titanio, por su composicion y sus propiedades fisico-químicas, actua de mejor manera como catodo, favovereciendo en el tratamiento la transferencia de electrones. Mas adelante, el desarrollo de este estudio permitira definir con claridad el tipo de anodo y arreglo de electrodos mas apropiado para el tratamiento, teniendo en cuenta los tres aspectos citados (eficiencia, estabilidad y costo de operación).

## 3.2.3. Análisis estadístico de %ECF

### 3.2.3.1. Tabla ANOVA

La tabla 3.4 presenta el análisis de resultados del DBB/Ti para el %ECF. Teniendo en cuenta los valores obtenidos para el valor P, se ha determinado que el efecto de la i y el efecto cuadrático del tipo de An son significativos con un 95% de confianza, sobre el %ECF.

**Tabla 3. 4.** ANOVA para %ECF, diseño Box-Behnken

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A:i	793.812	1	793.812	5.62	0.0496
B:Cd	296.096	1	296.096	2.1	0.191
C:An	3.9762	1	3.9762	0.03	0.8715
AA	239.32	1	239.32	1.69	0.2343
AB	111.936	1	111.936	0.79	0.403
BB	283.069	1	283.069	2	0.1999
CC	4439.04	1	4439.04	31.42	0.0008
Total error	989.045	7	141.29		
Total (Corr.)	6863.03	14			
$R^2 = 85.59$					
$R^2_{adj} = 71.18$					

El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para el modelo matemático obtenido del %ECF fue de 85.59, lo que implica que un 14.41% de la variabilidad de los datos no puede ser explicada por el modelo que se muestra en la ec. (3.4):

$$\%ECF = 336.6 - 3.13706*i - 0.369201*Cd - 139.398*An + 0.099393*i^2 + 0.00293889*i*Cd + 0.000218896*Cd^2 + 34.6733*An^2 \quad (3.7)$$

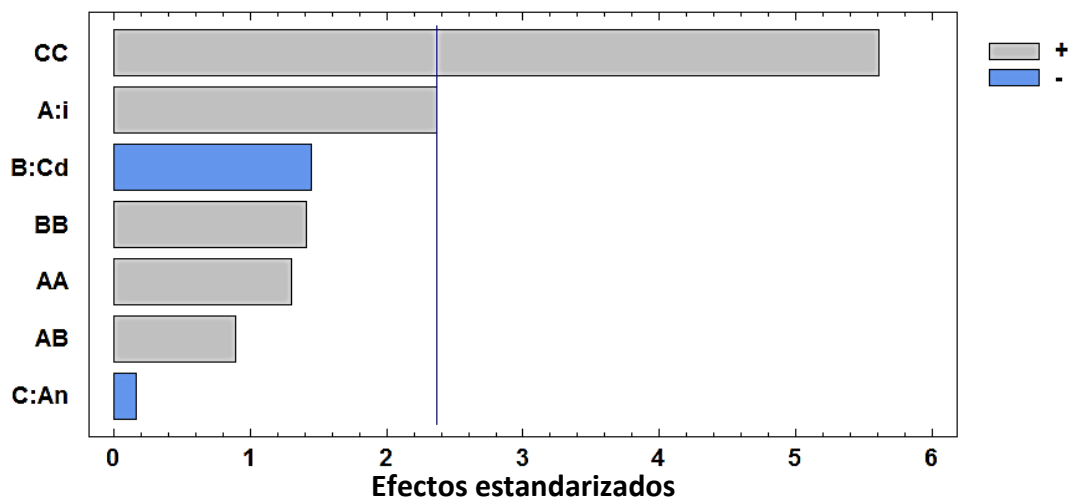
En este modelo, los cambios en el factor i y el factor de curvatura pura  $An^2$  son los que generarían un mayor impacto en los resultados de la variable de respuesta. Según las expectativas para la predicción de modelos matemáticos de diseños experimentales, el  $R^2_{adj}$  obtenido es aceptado, con un valor de 71.18%.

Se ha visto hasta ahora, que las tres variables estudiadas para la optimización del proceso, generan efectos significativos sobre las variables de respuesta evaluadas: el efecto de la i,  $An^2$  y la Cd. La i es esencial en este proceso, promueve la generación de radicales libres; por otro lado, la conductividad favorece la transferencia de electrones en el medio, lo que a su vez suscita la electrolisis del agua; y el tipo de ánodo, dependiendo de su sobre-potencial de oxígeno y otras propiedades, puede contribuir con una mayor velocidad del desencadenamiento de las reacciones electro-químicas y un menor consumo energético.

### 3.2.3.2. Diagrama de pareto

La figura 3.7 presenta el diagrama de Pareto obtenido para el %ECF. En este diagrama se observan de manera gráfica los efectos causados por cada uno de los factores y las

interacciones de los factores que se presentaron en la tabla ANOVA (Tabla 3.4). Se observa, que el factor  $i$  y la  $An^2$  (CC) sobre-pasan la línea de significancia.

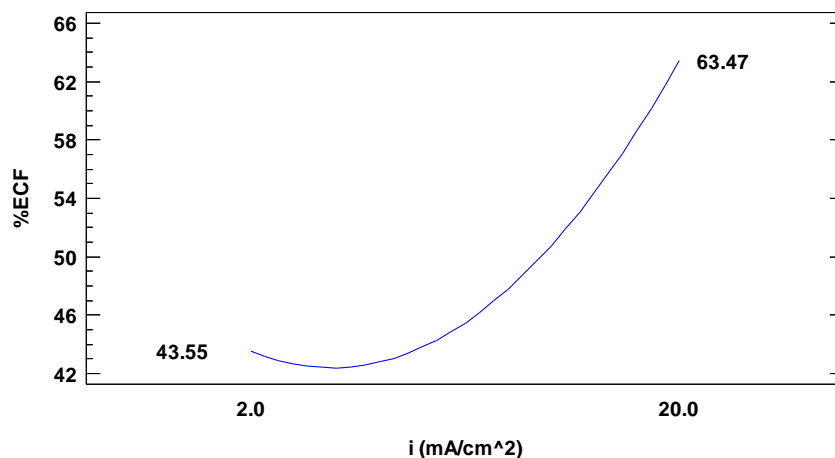


**Figura 3. 7.**Diagrama de Pareto para %ECF, Cd: Conductividad, An: tipo de ánodo e i: Densidad de corriente.

El mayor efecto causado sobre la variable de respuesta %ECF se da por parte de la interacción  $An^2$ . En orden de efectos significativos, se tiene a la  $i$ , cuyos resultados indican de nuevo una relación de proporcionalidad directa con la variable de respuesta. Entre los efectos no significativos, quien causa un mayor impacto en el %ECF es la Cd, y se mantiene la relación de proporcionalidad inversa entre este factor y la variable de respuesta.

### 3.2.3.3. Efecto de la densidad de corriente

La figura 3.8 presenta el efecto de la densidad de corriente sobre el %ECF. En esta figura se observa que al incrementar la densidad de corriente se obtiene un mayor %ECF.



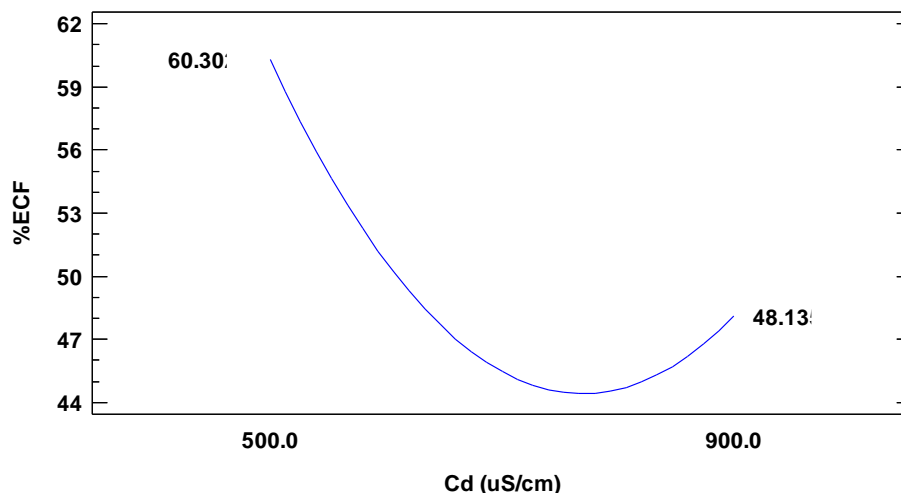
**Figura 3. 8.**Efecto de la densidad de corriente ( $i$ ) sobre la variable de respuesta %ECF.

Puede apreciarse que para el intervalo entre 2 hasta aproximadamente 8 mA/cm<sup>2</sup> el %ECF es bajo, pero cuando la *i* sobrepasa el límite superior de dicho intervalo, el %ECF aumenta. La eficiencia del proceso electro-químico aumenta al utilizar mayores *i*, debido a que se incrementa la generación de radicales <sup>•</sup>OH al promover la reacción de evolución de oxígeno. Los radicales <sup>•</sup>OH son la principal especie generada en este tratamiento que contribuye con la muerte de E.coli y de coliformes totales. Esta especie ataca la célula de los microorganismos, generando un cambio morfológico que conlleva a la ruptura de su pared celular y de la membrana citoplasmática al romperse los enlaces lipídicos y proteicos. La ruptura de la célula da salida al material intracelular, que finalmente también es oxidado por parte de los radicales <sup>•</sup>OH y otras especies oxidativas de menor potencial (Jeong *et al.*, 2006).

Durante el proceso de EO y teniendo en cuenta las condiciones de operación, existe un límite superior para el factor *i*, donde los cambios en la variable de respuesta son nulos o mínimos cuando esta sigue aumentando. La elección de una *i* óptima, dentro del límite superior, evita la formación de compuestos indeseados y la recombinación de los radicales <sup>•</sup>OH, fenómeno que ocasiona que se tenga un efecto adverso del tratamiento (Zhu *et al.*, 2011).

#### 3.2.3.4. Efecto de la conductividad

En la figura 3.9 se observa que el mayor efecto de la Cd en el %ECF es obtenido a 500 µS/cm (60.30 %ECF), mientras que el menor efecto es obtenido a 900 µS/cm (48.13% ECF).

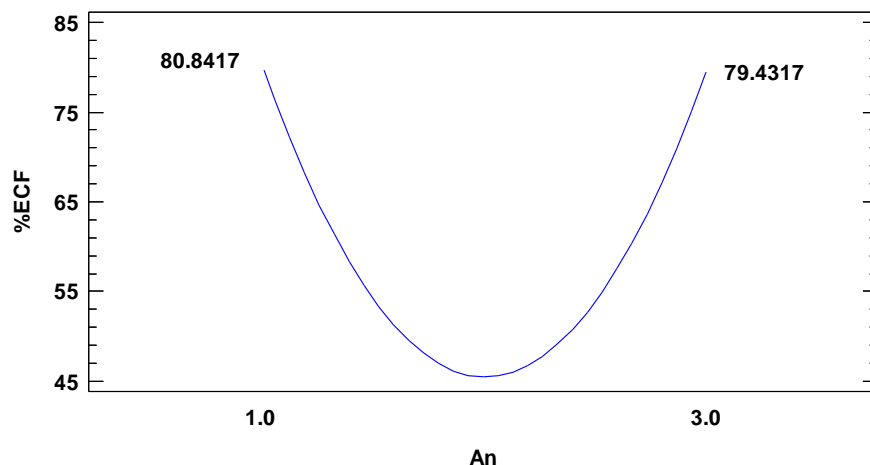


**Figura 3. 9.**Efecto del factor conductividad (Cd) sobre la variable de respuesta %ECF.

En la figura 3.9 se observa que para el intervalo entre 500 y aproximadamente 650 µS/cm son obtenidos los %ECF más altos, conservándose un efecto inversamente proporcional. Puede observarse que el proceso es más eficiente cuando se trabaja a menor Cd (500 µS/cm), mientras que al operar a mayor Cd (900 µS/cm) su eficiencia disminuye. Como se explicó previamente, elevadas concentraciones de NaSO<sub>4</sub> en el medio dan lugar a la generación de reacciones competitivas poco oxidativas, que disminuyen la velocidad de producción de radicales <sup>•</sup>OH, y que promueven su desperdicio a causa de la acción de las especies químicas producidas (O<sub>3</sub>, S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) en dichas reacciones.

### 3.2.3.5. Efecto del tipo de ánodo

En la figura 3.10 el efecto del tipo de ánodo sobre la variable de respuesta %ECF. Los efectos causados por el uso de ánodos de grafito y de DDB/Ti son casi idénticos, con una diferencia de un 1.7%.



**Figura 3. 10.**Efectos principales del factor tipo de ánodo (An) sobre la variable de respuesta %ECF

En la figura 3.10 se observa que el mayor efecto sobre el %ECF se obtiene con el uso de ánodo de grafito. A pesar de esto, el proceso electro-químico para eliminación de coliformes puede ser mejor con el uso del DDB, su sobre potencial de  $O_2$  permite la generación de grandes cantidades de radicales  $\cdot OH$  en un menor tiempo (Flox *et al.*, 2007); además es un tipo de electrodo altamente resistente a la corrosión en medios ácidos y de elevada diferencia de potencial, y tiene la capacidad de generar reacciones oxidativas que no pueden ser ejecutadas en el agua por otro tipo de electrodos, como el caso del grafito (Griesbach *et al.*, 2010; García *et al.*, 2013; Ramírez *et al.*, 2013); un electrodo que en comparación con el electrodo DDB, presenta desventajas, como el desprendimiento de material (polvo de carbono) durante el tratamiento electroquímico y la saturación de su superficie porosa por parte de los compuestos existentes o generados en el medio durante el tratamiento, fenómeno que causa una generación más lenta de radicales  $\cdot OH$  en el tiempo.

Al igual que para el %ECT (Figura 3.6), se observa que el cátodo de Ti favorece la eficiencia del proceso oxidativo. Es posible que el cátodo de DDB/Si promueva la generación de reacciones poco oxidativas en la presencia de  $NaSO_4$ , ocasionando una menor generación de radicales  $\cdot OH$ , y con ello una disminución en el %EC durante el tiempo del tratamiento.

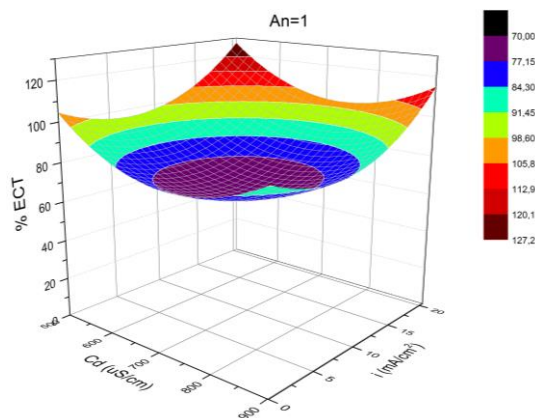
### 3.2.3. Metodología de Superficie de Respuesta (MSR)

A continuación se presentan los gráficos de Superficie de Respuesta. Para cada variable de respuesta (%ECT y %ECF) fueron realizados dos gráficos de superficie de respuesta, uno en relación al nivel 1 del factor An (grafito) y el otro en relación al nivel 3 del factor An (DDB/Ti). Lo anterior se debe, a que para ambos ánodos y cátodo de Ti, se obtienen altos %ECT y %ECF.



### 3.2.3.1. Diagramas de superficie de respuesta para %ECT

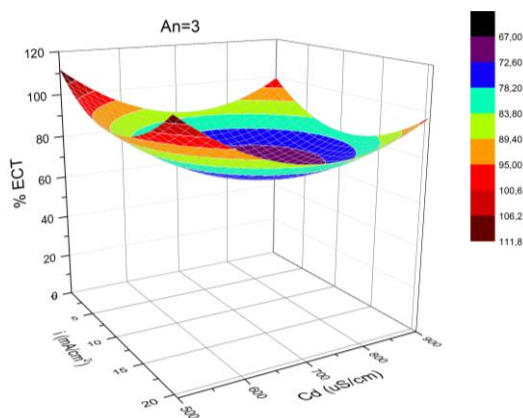
La figura 3.11, presenta el diagrama de superficie de respuesta para el %ECT usando ánodo de grafito.



**Figura 3. 11.**Diagrama de superficie de respuesta para %ECT, An=1: ánodo de grafito

La superficie de respuesta de la figura 3.11 muestra que con el uso de An=1, a bajas Cd (500-700  $\mu\text{S/cm}$ ) e i medias (10-15  $\text{mA/cm}^2$ ) pueden obtenerse altos %ECT.

En la figura 3.12 se puede apreciar la superficie de respuesta obtenida para el %ECT usando ánodo de DDB/Ti:

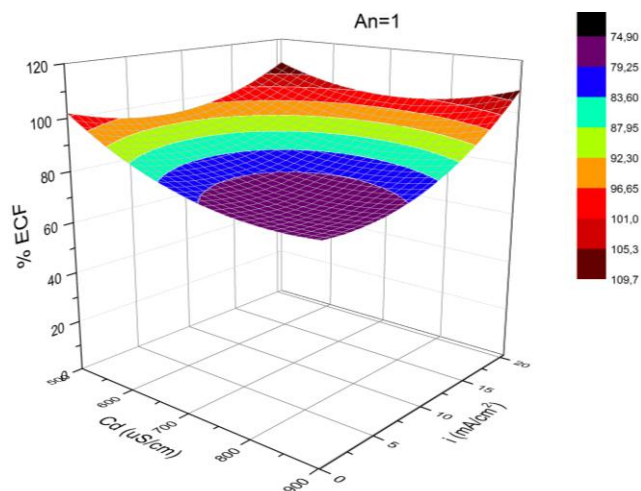


**Figura 3. 12.**Diagrama de superficie de respuesta para %ECT, An=3: ánodo DDB/Ti

En la figura, se observa un comportamiento similar, donde a valores de Cd entre 500 y 700  $\mu\text{S/cm}$  y sin la necesidad de una alta i (20  $\text{mA/cm}^2$ ) pueden obtenerse altos %ECT, llegando a obtener valores superiores del 89%. Tanto el electrodo de grafito como el de DDB/Ti permiten una alto %ECT.

### 3.2.3.2. Diagramas de superficie de respuesta para %ECF

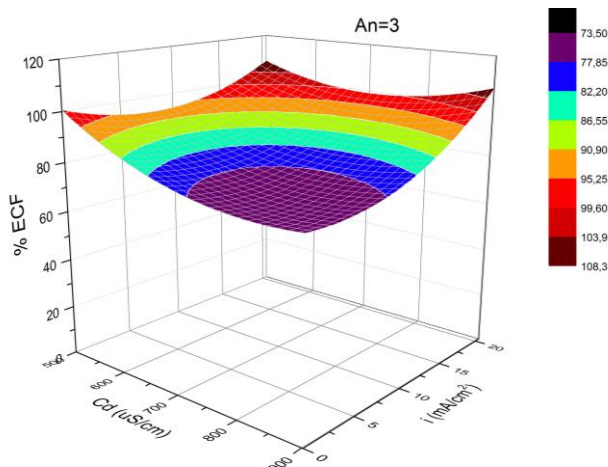
La figura 3.13 presenta la superficie de respuesta obtenida para la variable %ECF usando ánodo de grafito. Tanto la gráfica 3.11 (%ECT) como esta grafica (3.13) muestran que es posible obtener %ECF del 100%.



**Figura 3. 13.**Diagrama de superficie de respuesta para %ECF, An=1: ánodo de grafito

Para los coliformes fecales, la gráfica 3.13 muestra que el uso de electrodo de grafito permite alcanzar eliminaciones considerables de los microorganismos con conductividades bajas, incluso inferiores a 500  $\mu\text{S/cm}$ , y con densidades de corriente entre 10-15  $\text{mA/cm}^2$ .

La grafica 3.14, presenta la superficie de respuesta obtenida para el %ECF, usando ánodo DDB/Ti:



**Figura 3. 14.**Diagrama de superficie de respuesta para %ECF, An=3: ánodo de DDB

El diagrama de superficie de respuesta presentado en la figura 3.14 indica también que pueden alcanzarse muy buenos resultados de %ECF. Al trabajar con Cd bajas e i medias, es posible alcanzar altos %ECF, tanto para el electrodo de grafito como para el de DDB.

Teniendo en cuenta las gráficas de superficie de respuesta anteriores y con base en el análisis estadístico realizado, se obtienen las condiciones óptimas de operación para %ECT y %ECF mediante el proceso EO, y son: Cd: 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,  $i=10 \text{ mA}/\text{cm}^2$  y An: grafito o DDB/Ti. Las condiciones óptimas de operación son esenciales y necesarias para el desarrollo de los estudios cinéticos y para el diseño conceptual de la planta de tratamiento de agua, con el fin de determinar el tiempo de operación de la planta del proceso de electro-desinfección.

### 3.3.CINÉTICAS DE ELIMINACIÓN DE COLIFORMES TOTALES Y FECALES

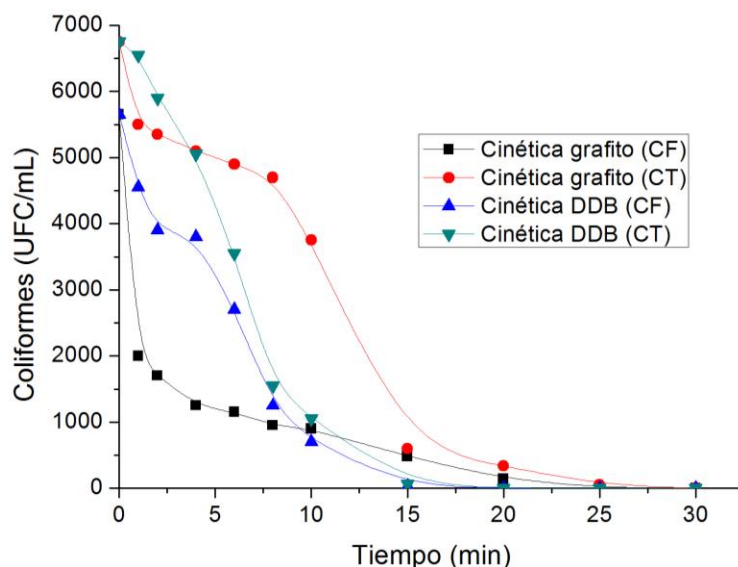
Fueron realizados dos estudios cinéticos durante 30 minutos de electrólisis, con el fin de evaluar la eliminación de microorganismos (CT y CF) en el tiempo. Durante cada cinética se tomaron muestras de agua en los minutos 1, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25 y 30, cuantificando los coliformes presentes en el agua en cada instante de tiempo establecido. Otras variables fisicoquímicas fueron medidas al inicio y al final del estudio cinético: DQO, COT, sólidos totales, turbidez, pH, conductividad, nitratos y nitritos.

En la tabla 3.5, se pueden observar los resultados obtenidos de la eliminación de coliformes durante el tiempo de reacción, para los estudios cinéticos: estudio cinético con ánodo de grafito y cátodo de Ti (Cinética 1) y estudio cinético con ánodo de DDB/Ti y cátodo de Ti (Cinética 2).

**Tabla 3. 5.** Cinética de eliminación de coliformes totales y fecales.

Tiempo (min)	Cinética 1		Cinética 2	
	CF (UFC/mL)	CT (UFC/mL)	CF (UFC/mL)	CT (UFC/mL)
0	5650	6750	5650	6750
1	2000	5500	4550	6550
2	1700	5350	3900	5900
4	1250	5100	3800	5050
6	1150	4900	2700	3550
8	950	4700	1250	1550
10	900	3750	700	1050
15	480	600	30	64
20	140	340	1	2
25	9	49	0	0
30	0	0	0	0

En los resultados presentados en la tabla 3.5 se observa una muerte total de coliformes (0 UFC/mL) en los minutos 25 y 30 para los estudios cinéticos realizados con ánodo de DDB/Ti y con ánodo de grafito/Ti respectivamente. La figura 3.15 presenta de manera gráfica los resultados obtenidos.

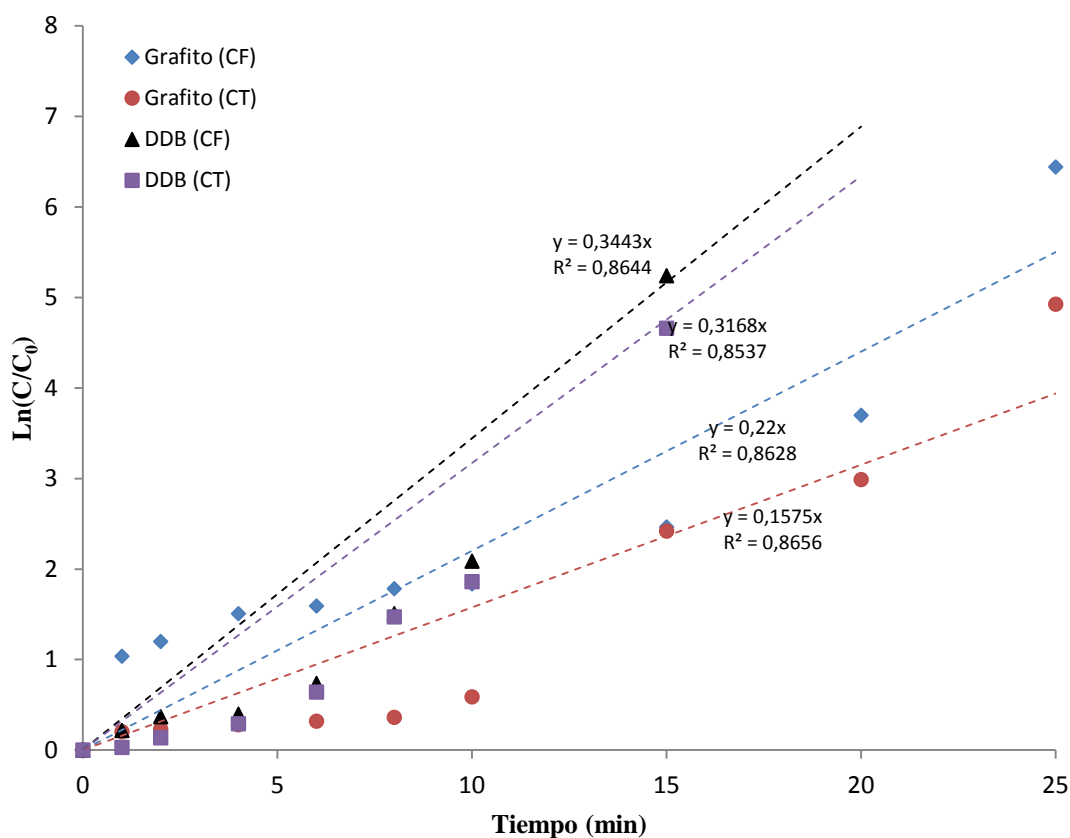


**Figura 3. 15.** Eliminación de coliformes en el tiempo, bajo las condiciones óptimas: Cd: 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,  $i=10 \text{ mA}/\text{cm}^2$ , An: grafito o DDB/Ti,  $A_s$ :  $4\text{cm}^2$ , C: 350 rpm y distancia entre electrodos: 1 cm.

En la figura 3.15 se observa la eliminación de los coliformes bajo las condiciones óptimas. Desde el inicio del tratamiento hasta el minuto 10, la eliminación de CF es mayor con el uso de ánodo de grafito/Ti que con el uso del ánodo DDB/Ti, mientras que la eliminación de CT durante los 30 minutos de tratamiento es mayor cuando el proceso electro-químico es operado con ánodo de DDB/Ti. Los CT son conformados por colonias de CF y de otros coliformes, es posible que las especies oxidativas (radicales  $\cdot\text{OH}$ , entre otras) generadas durante el tratamiento evaluado con el uso de ánodo de DDB/Ti tengan un mayor efecto en la eliminación de otro tipo de coliformes, diferentes a *E. coli*, y por ello la eliminación de CT se logre de forma más rápida desde el inicio del tratamiento con este tipo de ánodo. A partir del minuto 10, usando electrodo DDB/Ti se logran eliminaciones más rápidas de CF, en comparación con el uso de ánodo de grafito/Ti, cuya velocidad de eliminación se mantiene constante luego de este instante de tiempo. Este comportamiento puede ser debido a una saturación de la superficie del grafito poroso por parte de las especies químicas producidas durante el proceso; lo cual puede ocasionar que la reacción de evolución de  $\text{O}_2$  requiera de mayor tiempo. La superficie del ánodo de DDB/Ti es lisa, las especies químicas producidas y adsorbidas sobre su superficie pueden des-adherirse con mayor facilidad para reaccionar con los coliformes y permitir la nueva generación de especies oxidativas sobre la superficie no saturada.

Para un tiempo de 30 minutos ya se han logrado eliminar en ambos procesos la totalidad de los coliformes. En 2014 *Rajab et al.* realizaron un estudio cinético a una  $i$  de  $167 \text{ mA}/\text{cm}^2$  para tratar un volumen de 45 mL de agua con presencia de coliformes, donde se logró una inactivación de 90.31% luego de 15 minutos de tratamiento con el uso de electrodo DDB. Un mayor tiempo de reacción podría permitir la eliminación total de los microorganismos, como el caso registrado en esta investigación.

Para el análisis cinético de los resultados presentados en la tabla 3.5 se lograron obtener buenas correlaciones lineales. El proceso evaluado fue representado por un modelo cinético de primer orden, basado en la muerte de microorganismos. En la figura 3.16 se presentan los ajustes cinéticos de primer orden obtenidos para la muerte coliformes totales y fecales, para los dos ánodos seleccionados, DDB/Ti y grafito/Ti:



**Figura 3. 16.** Ajuste cinético de primer orden, para la eliminación de coliformes, bajo las condiciones óptimas: Cd: 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,  $i=10 \text{ mA}/\text{cm}^2$ . An: grafito o DDB/Ti,  $A_s$ :  $4\text{cm}^2$ , C: 350 rpm y distancia entre electrodos: 1 cm.

En la figura 3.16 puede observarse que para la cinética de eliminación de CF con el uso de electrodo de grafito se obtuvo un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.8628, con lo que se tiene que un 13.72% de los datos no se ajustan a la tendencia lineal. A pesar de esto, dentro de los órdenes de reacción 0, 1 y 2, esta cinética presenta el mejor ajuste para el proceso característico de una cinética de primer orden. Al igual que para este investigación, en 2013 Cotillas *et al.*, en su estudio de electro-desinfección de aguas urbanas, determinaron mediante una cinética de eliminación que la concentración de E.coli disminuye de manera exponencial con una tendencia característica de los procesos electroquímicos que siguen una cinética de primer orden.

Al igual que para la cinética de eliminación de CF, la cinética de eliminación de CT con ánodo de grafito presentada en la figura 3.16 muestra un porcentaje de no ajuste de los datos a la tendencia lineal. El coeficiente  $R^2$  tiene un valor de 0.8656, es decir, un 13.44% de los datos no pueden ser explicados por un modelo cinético de primer orden; sin embargo, este es el proceso cinético para el cual se tiene el mejor ajuste en el proceso de muerte de CT con uso de ánodo de grafito. Otros estudios han reportado un comportamiento similar, en 2015 el proceso de electro-desinfección evaluado por Rabaj *et al.* permitió conocer que con la aplicación de bajas densidades de corriente, la inactivación de los microorganismos diferentes a E.coli sigue una curva cinética de primer orden. Para la cinética de eliminación de CF con el uso de electrodo de DDB se registra que un 13.56% de los datos no siguen una tendencia lineal. A pesar de esto, el modelo cinético de primer orden es el que mejor se ajusta. Finalmente, la eliminación de CT con uso de electrodo de DDB, tiene un ajuste lineal del 85.37%. Al igual que para las otras cinéticas, el mejor ajuste para la muerte de CT con el uso de ánodo DDB, es el modelo cinético de primer orden. Cabe mencionar que en otros casos, como el en el estudio cinético de la inactivación de microorganismos, realizado por Schmalz *et al.*, en 2009, se encontró que la muerte de microorganismos sigue una cinética de pseudo-primer orden.

La cinética de pseudo-primer orden ocurre cuando la concentración de uno de los reactivos es muy grande en comparación a la concentración del otro. En tal caso, la concentración del reactivo en exceso puede considerarse constante con el tiempo, (MIT, 2001) por lo que el orden de la reacción deja de ser de primer o segundo orden debido a los coeficientes estequiométricos y se transforma en una reacción cuya cinética es denominada de pseudo-primer orden.

Los resultados de los parámetros físico-químicos y microbiológicos medidos al inicio y al final del tratamiento se presentan en la tabla 3.6. De la misma manera, la tabla 3.6 contiene los valores máximos aceptables contemplados en la norma para el agua de consumo humano (MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2007):

**Tabla 3. 6.**Caracterización del agua antes y después del estudio cinético.

	Parámetro Inicial (agua sin tratar)	Parámetro Final Cinética 1	Parámetro Final Cinética 2	Valor máximo aceptable (agua de consumo humano)
<b>pH</b>	6.6	6.65	7.28	6.5-9.0
<b>Conductividad (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>)</b>	268.3	567	550	1000
<b>Sólidos totales (g/mL)</b>	0.0018	0.0022	0.0001	
<b>Turbidez (NTU)</b>	5	5	3	2
<b>DQO (mg/L)</b>	60.5	58.5	53.5	
<b>COT (mg/L)</b>	16	14	12	5
<b>Nitratos (mg/L <math>\text{NO}_3</math>)</b>	0.87	1.29	1.44	10
<b>Nitritos (mg/L <math>\text{NO}_2</math>)</b>	0.183	0.038	0.096	0.1
<b>CT (UFC/mL)</b>	6750	0	0	0
<b>CF (UFC/mL)</b>	5650	0	0	0

Se determinó que bajo el tratamiento electroquímico, además de eliminar los coliformes presentes en el agua, se reduce la DQO, el COT, turbidez y sólidos totales debido a la oxidación química de los compuestos orgánicos presentes en el agua cruda. Los sólidos totales y la turbidez son parámetros que se reducen únicamente en la Cinética 1. Lo anterior puede deberse al desprendimiento de material de grafito en el agua durante el tratamiento. Para los parámetros de turbidez y COT no se alcanzan los valores aceptables por la norma mediante el tratamiento electroquímico. Es posible que los resultados de medición obtenidos para el COT sean menores, puede existir un margen de error en dichas mediciones debido al límite de detección del método COT empleado, kit test 0-94, cuyo rango de medición va desde 10 hasta 60 mg/L, es decir, mediante este método no podrían ser detectados valores de COT inferiores a 10 mg/L. En cualquier caso, los artículos 2 y 6 de la resolución 2115 de 2007 establecen que los parámetros físicos y químicos como la turbiedad y el COT, no podrán sobrepasar los valores máximos aceptables para el agua de consumo humano. Se deben tomar las medidas necesarias para su reducción (MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2007).

Parámetros como el pH y la conductividad aumentan con el tratamiento, lo cual puede ser atribuido a la formación de nuevos compuestos, o la oxidación de compuestos existentes. Debido al proceso oxidativo realizado, los nitritos se convierten en nitratos, por tanto estos últimos disminuyen al final del tratamiento, mientras que se obtiene un valor mayor de nitratos en el agua potable.

Los parámetros microbiológicos, concentración de CT y CF, alcanzan los valores aceptables por la norma mediante el tratamiento de electro-desinfección aplicado. El proceso electroquímico debe asegurar que en el agua tratada, ya sin la presencia de coliformes, no se dé un recrecimiento de colonias de bacterianas al menos en el tiempo en que esta será consumida; de lo contrario perdería las características microbiológicas exigidas por la norma para el agua de consumo humano (0 UFC/mL de coliformes totales y fecales) (MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2007). Durante la investigación, una vez finalizado el tratamiento, el agua fue almacenada para realizar un seguimiento microbiológico durante 15 días. Para realizar este seguimiento tanto el agua tratada con el ánodo de DDB/Ti como el agua tratada con ánodo de grafito/Ti, ya sin la presencia de coliformes, se dispuso en tubos falcon esteriles. Se realizaron mediciones microbiológicas a cada muestra, en los días 3, 7 y 15. Este procedimiento se hizo en tubos falcon individuales para cada medición, con el fin de asegurar un correcto análisis microbiológico. Los resultados no mostraron un recrecimiento de colonias de coliformes en ninguno de los casos, el agua se mantuvo desinfectada durante 15 días. Las muestras de agua se analizaron sin dilución y con diluciones 1/100 y 1/1000.

### **3.4. CONCLUSIONES**

El proceso de electro-desinfección empleando ánodos de DDB y grafito, y cátodo de Ti, se puede aplicar de manera eficiente para la eliminación de CT y CF presentes en aguas crudas. De manera particular, las siguientes conclusiones pueden extraerse a partir de los resultados de la investigación:

(i) Con base en el análisis estadístico preliminar, se concluye que los factores con un efecto significativo sobre las variables de respuesta analizadas (%ECT y %ECF) son: la densidad de corriente, el tipo de ánodo y la conductividad. (ii) El tratamiento de oxidación anódica es efectivo en la etapa de desinfección del agua cruda Colombiana estudiada (Quebrada “la Presidenta”, Medellín-Colombia), bajo las condiciones óptimas de operación:  $Cd = 500 \mu S/cm$ ,  $i = 10 mA/cm^2$  y An= grafito y DDB. (iii) Con base en los resultados obtenidos en el análisis cinético de eliminación de coliformes, se concluye que el proceso de electro-desinfección evaluado es altamente eficiente, con resultados positivos que muestran una eliminación total de coliformes presentes en el agua. La alta eficiencia del proceso es duradera en el tiempo, no se registra recrecimiento de coliformes luego de 15 días del almacenamiento del agua tratada, lo que indica que se han utilizado las condiciones de operación que aseguran un agua apta para el consumo humano en términos de parámetros microbiológicos.

El tiempo requerido para la eliminación total de coliformes es menor con el uso de electrodo de DDB/Ti que con el electrodo de grafito/Ti, sin embargo, teniendo en cuenta los resultados obtenidos se considera que ambos tipos de ánodo son eficientes para el proceso. El posterior diseño conceptual y análisis de factibilidad económica que se presentan en el capítulo 4 permitirán definir cuál de los dos tipos de ánodo es el mejor para su implementación en la planta de tratamiento electro-química.

### 3.5. REFERENCIAS

Cotillas, S., Llanos, J., Cañizares, P., Mateo, S., & Rodrigo, M. A. (2013). Optimization of an integrated electrodisinfection/electrocoagulation process with Al bipolar electrodes for urban wastewater reclamation. *Water research*, 47, (5), 1741-1750.

De la Vara, R., & Gutiérrez, H. (2012). *ANÁLISIS Y DISEÑO DE EXPERIMENTOS*. México: McGraw-Hill, 2da Edición.

Flox, C., Cabot, P.-L., Centellas, F., Garrido, J. A., Rodríguez, R. M., & Arias, C. (2006). Electrochemical combustion of herbicide mecoprop in aqueous medium using a flow reactor with a boron-doped diamond anode. *Chemosphere*, 64, 892-902.

Flox, C., Cabot, P.-L., Centellas, F., Garrido, J. A., Rodríguez, R. M., Arias, C., Brillas, E. (2007). Solar photoelectro-Fenton degradation of cresols using a flow reactor with a boron-doped diamond anode. *Applied catalysis B: Environmental*, 75, (1-2), 17-28.

Flox, C., Garrido, J., Rodríguez, R., Centellas, F., Cabot, P., Arias, C., Brillas, E. (2005). Degradation of 4,6-dinitro-o-cresol from water by anodic oxidation with a boron-doped diamond electrode. *Electrochim. Acta* 50, 2685-3692.

García, O., Isarain-Chávez, E., Garcia-Segura, S., Brillas, E., & Peralta-Hernández, J. M. (2013). Degradation of 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid by Electro-oxidation and electroFenton/BDD Processes Using a Pre-pilot Plant. *Electrocatalysis*, 4, (4), 224-234.



- GilPavas, E., Gómez, C., Gómez-García, M., Dobrosz-Gómez, I. (2015). Decolorization and mineralization of Yellow 5 (E102) by UV/Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process. Optimization of the operational conditions by Response Surface Methodology. *Compt. Rendus Chimie*, 18, (10), 1152-1160.
- Griesbach, U., Malkowsky, I. M., & Waldvogel, S. R. (2010). Green Electroorganic Synthesis Using BDD Electrodes. In C. Comninellis, & G. Chen, *Electrochemistry for the environment*, 1, 125-141. New York: Springer.
- Hellman, A., Iandolo, B., Wickman, B., Grönbeck, H., & Baltrusaitis, J. (2015). Electro-oxidation of water on hematite: Effects of surface termination and oxygen vacancies investigated by first-principles. *Surface Science*, 640, 45-49.
- Jeong, J., Kim, J. Y., & Yoon, J. (2006). The Role of Reactive Oxygen Species in the Electrochemical Inactivation of Microorganisms. *Environ. Sci. Technol.*, 40, 6117-6122.
- Lisle, J. Broad away, S. Presscott, A. Pyle, B. Fricker, C. and McFeters, C. (1998). Effects of starvation on physiological activity and Chlorine disinfection Resistance in E. coli O157:H7, *Applied and Environmental Microbiology (AEM)*, 64, (12), 4658-4652
- MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. (2007). *Resolución 2115*. República de Colombia.
- MIT. (Septiembre de 2001). Cinética Química. Obtenido de MIT OPENCOURSEWARE: <http://mit.ocw.universia.net/sección7.51>.
- Murugananthan, M., Latha, S., Bhaskar-Raju, G., Yoshihara, S. (2010). Anodic oxidation of ketoprofen – an anti-inflammatory drug using boron doped diamond and platinum electrodes. *J. of Hazard Mater.* 180, 753-758
- Ramírez, C., Saldaña, A., Hernández, B., Acero, R., Guerra, R., Garcia-Segura, S., Brillas, E., Peralta-Hernandez, J. M. (2013). Electrochemical oxidation of methyl orange azo dye at pilot flow plant using BDD technology. *J. of Ind. and Eng. Chemistry*, 19, (2), 571-579.
- Rajab, M., Heim, C., Letzel, T., Drewes, J., & Helmreich, B. (2015). Electrochemical disinfection using boron-doped diamond electrode – The synergetic effects of in situ ozone and free chlorine generation. *Chemosphere*, (121), 47-53.
- Särkkä, H., & Bhatnagar, A. S. (2015). Recent developments of electro-oxidation in water treatment—A review. *Electroanalytical Chemistry*, 754, 46-56.
- Schmalz, V., Dittmar, T., Haaken, D., & Worch, E. (2009). Electrochemical disinfection of biologically treated wastewater from small treatment systems by using boron-doped diamond (BDD) electrodes – Contribution for direct reuse of domestic wastewater. *Water Research*, 5260-5266.

Smith, R., & Parkinson, J. (1980). Overlapping genes at the cheA locus of Escherichia coli. *Genetics*, 77, (9), 5370-5374.

Zhu, X., Ni, J., & Lai, P. (2009). Advanced treatment of biologically pretreated coking wastewater by electrochemical oxidation using boron-doped diamond electrodes. *Water research*, 43, (17), 4347-4355.

Zhu, X., Ni, J., Wei, J., & Chen, P. (2011). Scale-up of B-doped diamond anode system for electrochemical oxidation of phenol simulated wastewater in batch mode. *Electrochimica Acta*, 56, 9439-9447.

## **4. DISEÑO CONCEPTUAL**

### **RESUMEN**

El capítulo cuatro presenta el diseño conceptual de la etapa de desinfección del proceso de potabilización de agua, utilizando como método alternativo la electro-oxidación. El diseño fue realizado bajo las condiciones óptimas establecidas en la etapa de experimentación del presente proyecto. Se presentan: el “Process Design specification” (PDS), Diagrama de entradas y salidas, descripción del proceso, Diagrama de bloques (BFD), diagrama de flujo del proceso (PFD) y por último el análisis financiero del proyecto a escala industrial. A partir del análisis de factibilidad y teniendo en cuenta aspectos técnicos, se determinó que el ánodo DDB es el electrodo óptimo de operación, este ha demostrado gran eficiencia en la eliminación de coliformes totales y fecales en el agua en cuanto a tiempos de operación y gastos energéticos. El tiempo empleado en la eliminación total de los microorganismos con el electrodo DDB es menor que el requerido con el electrodo de grafito; para este último, se presenta una saturación de la superficie porosa por parte de las especies químicas producidas durante el tratamiento; lo cual puede ocasionar que la reacción de evolución de O<sub>2</sub> sea menos eficiente. Además de lo anterior, el sobre potencial de oxígeno del electrodo DDB y su capacidad de conducir la energía eléctrica de una forma más eficiente a lo largo de su superficie, permitió obtener un costo menor asociado al consumo de energía en comparación al requerido con el ánodo de grafito. Los factores nombrados previamente, permitieron establecer que el estudio de la implementación del proyecto con el electrodo DDB genere mayores utilidades.

### **4.1.DISEÑO CONCEPTUAL DEL PROCESO DE ELECTRO-OXIDACIÓN A ESCALA INDUSTRIAL.**

#### **4.1.1. Process Design Specification (PSD)**

En esta sección se indican las diferentes especificaciones de diseño del proceso de electro-desinfección. Además, se identifican cada una de las etapas que intervienen en el proceso de potabilización de agua: adsorción, coagulación, floculación, sedimentación, filtración y por último desinfección, etapa de interés del presente proyecto.

Es importante explicar que en el proceso de potabilización de agua, la etapa de desinfección se identifica como una de las más importantes para conferir al agua las características que la hacen potable, debido a que en esta etapa se da la remoción de coliformes, virus y posibles patógenos presentes en el agua sin tratar (EPA, office of water, 1999).

Se indica también en esta sección la ubicación geográfica de la misma y sus características. Además, se mencionan las características de la materia prima y el producto, la disponibilidad energética y el mercado potencial.

#### 4.1.1.1. Aguas crudas

En las tablas 4.1 y 4.2, se presentan las especificaciones del agua y su caracterización:

**Tabla 4. 1.** Especificaciones del agua utilizada para el desarrollo del proyecto.

ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO	
Nombre Comercial	Agua de vertimiento
Nomenclatura y fórmula química	Óxido de hidrógeno (H <sub>2</sub> O)

**Tabla 4. 2.** Características del agua una vez realizado el tratamiento. (MINISTERIO DE PROTECCIÓN SOCIAL, AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2007).

PROPIEDAD	VALOR
Color Aparente (UPC)	15
Conductividad (μS/cm)	1000
pH	6,5-9,0
COT (mg/L)	5
CT- CF (UFC)	0
Turbidez (NTU)	2

#### 4.1.1.2. Especificaciones de reactivos utilizados en el proceso

**Nombre:** sulfato de sodio

**Fórmula química:** Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

**Usos comunes:** industrias de detergentes, papel, textiles, químicos inorgánicos como sulfuro de sodio e hipo sulfuro de sodio, entre otros.

**% molar:** 99

**Número C.A.S:** 7757-82-6

**Propiedades físicas y químicas:**

**Apariencia:** cristales o polvos blancos.

**Olor:** inodoro

**pH:** 4,9 (solución del 5%)

**Punto de ebullición (°C):** 1110

**Gravedad específica (agua = 1):** 2,68

**Viscosidad:** 2,48 (solución al 22%)

**Solubilidad en agua (@ 20°C):** soluble en agua fría. 1 en 2 partes máximo a 33°C.

**Fórmula molecular:** Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

**Peso molecular:** 142,04 g/gmol  
**Costo:** 1800 COP/Kg (Químicos JM S.A., 2015)

#### **4.1.1.3. Ubicación geográfica**

Debido a la localización respecto a disponibilidad de maquinaria y equipos, la cantidad de potenciales sitios para distribuir y prestar el servicio, las condiciones climáticas, necesidades de la población respecto al recurso hídrico, así como de servicios públicos y mano de obra; se selecciona el municipio de Rionegro como el principal prospecto para situar la planta de tratamiento de agua mediante electro- desinfección.

Rionegro se encuentra ubicado en el departamento de Antioquia – Colombia, en la subregión del Oriente. Se localiza a 2130 metros sobre el nivel del mar. Su extensión territorial es de 196 km<sup>2</sup> y tiene una temperatura media de 18,5° C. Se encuentra a 48 km de la ciudad de Medellín (Alcaldía de Rionegro, 2012).

Un 98,7% de las viviendas pertenecientes a Rionegro cuentan con servicio de energía eléctrica, un 95,6% tienen servicio de acueducto, por lo tanto, podemos concluir que aproximadamente un 4,4% de la población no cuenta con servicio de acueducto. (DANE, 2005), sin embargo, debido a que limita al norte con los municipios de Guarne y San Vicente, por el este con los municipios de Marinilla y El Carmen de Viboral, por el sur con el municipio de La Ceja, y por el oeste con los municipios de El Retiro, Envigado y Medellín, presenta una ubicación potencial para apoyar a las diferentes zonas rurales de estas zonas.

#### **4.1.1.4. Capacidad de la planta**

Debido a que el foco son las aguas crudas de las zonas rurales de las veredas, la capacidad de la planta será de aproximadamente 200 m<sup>3</sup>/día, para una población por vereda de 1000 personas y que el consumo por persona promedio es de 6 m<sup>3</sup>/mes de agua. (IDEAM, 2015).

Se planea que opere los 365 días del año y bajo operación de tipo batch, tres turnos de 8 horas cada uno. Específicamente el proceso de desinfección, requiere de 60 minutos/lote, basándose en tiempos por tratamiento: 15 minutos de montaje, 30 minutos tratamiento electroquímico, 15 minutos de desmontaje. El volumen a tratar será de 8,33 m<sup>3</sup>/hr, para cumplir con la demanda de 200 m<sup>3</sup>/día establecida previamente.

El interés del presente proyecto es únicamente la etapa de desinfección, en la cual se utilizó un método alternativo, electro-desinfección. Se debe tener en cuenta que si se desea realizar el análisis completo del proceso de potabilización, los tiempos asociados a cada operación unitaria: adsorción, coagulación, floculación y sedimentación, deberán incluirse.

#### **4.1.1.5. Servicios requeridos y disponibles**

El principal servicio industrial es la energía eléctrica, esta es necesaria para el funcionamiento de la planta (Las bombas, reactor, agitador, fuente de voltaje) y es suministrado por empresas Públicas de Medellín (EPM). EPM tiene una participación del 21.11% de la demanda del país (Empresas Publicas de Medellín, 2014).

#### 4.1.1.6. Legislación ambiental aplicable

La planta se debe basar principalmente en la reglamentación dictada por el decreto 1575 de 2007, en el cual se define como agua potable aquella cuyas características físicas, químicas y microbiológicas cumplen con los parámetros establecidos en la resolución 2115 de 2007 y demás normas que los reglamenten, de manera que el agua sea apta para consumo humano (Ministerio de protección social, ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2007).

Además de lo anterior, aplican las siguientes reglamentaciones:

- Ley 55 de 1993: Mediante la cual se aprueba el "Convenio número 170 y la Recomendación número 177 sobre la Seguridad en la Utilización de los Productos Químicos en el Trabajo", adoptados por la 77a. Reunión de la Conferencia General de la OIT, Ginebra, 1990.
- Ley 430 de 1998: Por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones.
- Resolución 1402: Por el cual se desarrolla parcialmente el decreto 4741, en materia de residuos o desechos peligrosos.
- Decreto 2811 de 1974: Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.
- Ley 9 de 1979: Por la cual se dictan medidas sanitarias.
- Ley 373 de 1997: Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua.

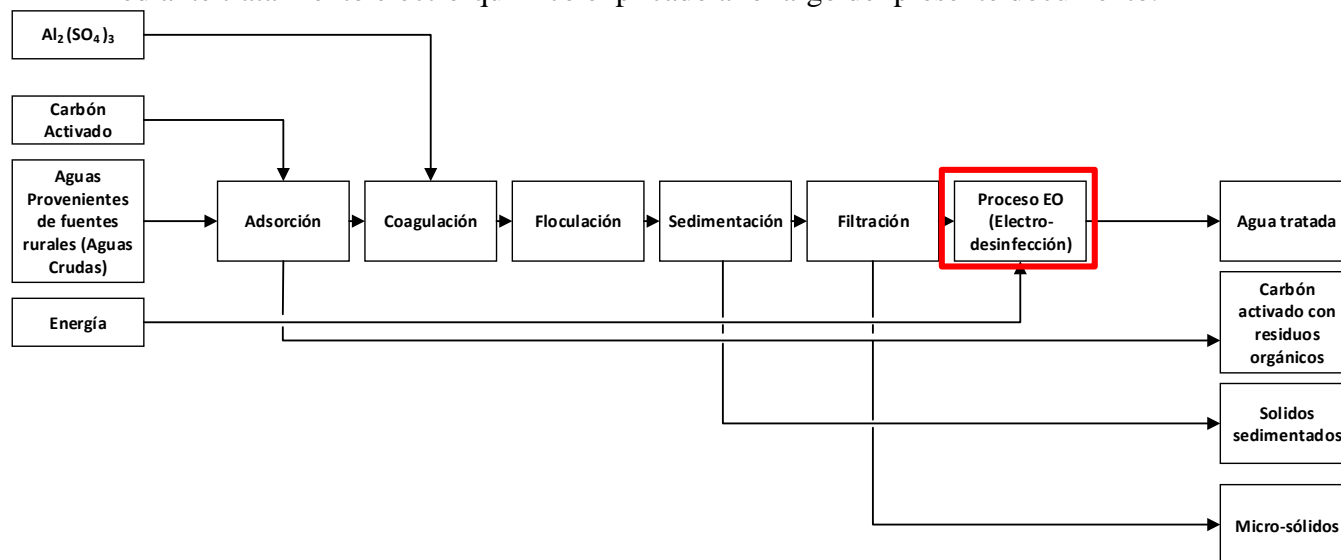
Los estándares de diseño aplicables para el diseño, desarrollo y ejecución del proceso son:

- ANSI: entre estos estándares se tienen el siguiente como ejemplo. (American National Standards Institute)
  - ANSI/NFPA 70E: Requisitos de seguridad eléctrica para empleados en su lugar de trabajo.
- OSHA (Administración de Seguridad y Salud Ocupacional)
- ASME (American Society Of Mechanical Engineers)
- TEMA (Tubular Exchangers Manufacturer's Association)
- ISO (International Organization for Standardization): entre estos estándares se tendrían en cuenta las siguientes normas:
  - ISO 9001 Sistemas de Calidad: Modelo para Aseguramiento de Calidad en Diseño, Desarrollo, Producción, Instalación y Servicio; Segunda Edición; (CEN EN ISO 9001:1994) (PNS 1001: 1994) (CAN/CSA-ISO 9001-94).
  - ISO 9002 Sistemas de Calidad: Modelo para Aseguramiento de Calidad en Desarrollo, Producción, Instalación y Servicio; Segunda Edición; (PNS 1002: 1994) (CAN/CSA- ISO 9002-94)
  - ISO-10012: Sistema de Confirmación Metrológica para Equipo de Medición.
  - ISO 10628:97: Elaboración de diagramas de proceso.
- NTC (Norma Técnica Colombiana): entre estas normas se pueden tener en cuenta las siguientes como ejemplo:

- NTC 4435: aplica a la preparación de las hojas de seguridad de materiales para sustancias químicas y materiales usados en condiciones ocupacionales industriales.
- NTC-ISO 14001: sistemas de gestión ambiental. Requisitos con orientación para su uso (Icontec Internacional).
- ISA (International Standard Organization): entre estos estándares se podrían utilizar los siguientes, por ejemplo:
  - ISA MC96.1 Termopares de Medición de Temperatura
  - ISA RP60.8 Guía eléctrica para centros de control
  - ISA S5.1 Símbolos e Identificación de los Instrumentos ANSI/ISA-1984

#### 4.1.2. Diagrama de entradas y salidas

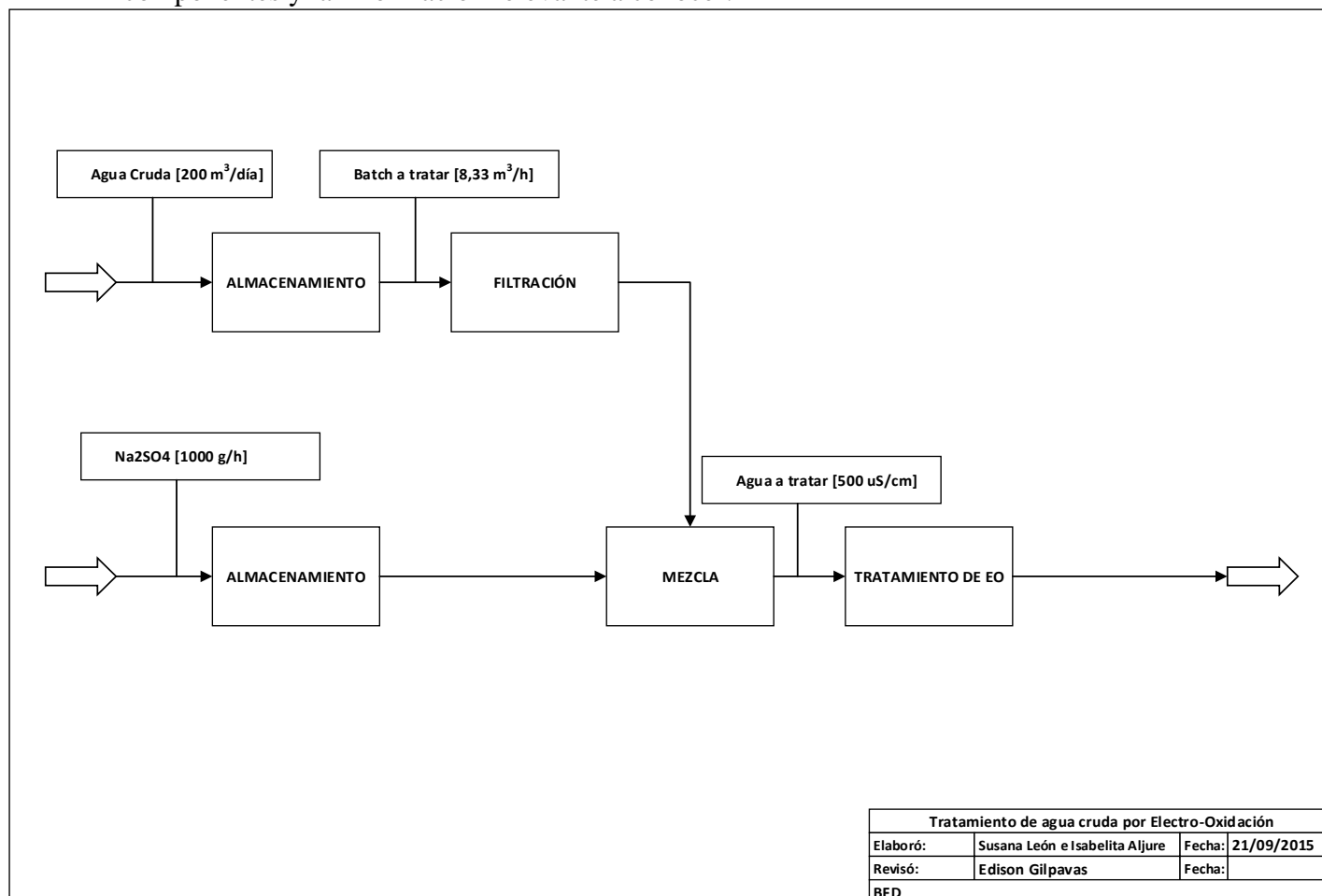
Este diagrama permite tener una visión general y global del proceso de potabilización de aguas. Como etapa inicial se definen las corrientes de entrada al proceso las cuales corresponden a todos los recursos requeridos. En este diagrama, los procesos se representan en cuadros y las corrientes tanto de entrada como de salida con flechas con la dirección correspondiente. Los recursos y productos obtenidos también se representan en cuadros (Turton *et al.*, 2009). Es importante tener en cuenta que aunque el diagrama presentado a continuación hace referencia al proceso completo de potabilización, se señala en este diagrama en un recuadro, la etapa de desinfección que se evaluó en la presente investigación, mediante tratamiento electro-químico explicado a lo largo del presente documento.



**Figura 4. 1.**Diagrama de entradas y salidas del proceso de potabilización (EO).

#### 4.1.3. Diagrama de bloques del proceso (BFD)

En la figura 4.2 se muestra el diagrama de bloques, que representa el proceso de desinfección de agua cruda mediante el proceso de EO. Este Diagrama de flujo de proceso (BFD por sus siglas en inglés) está conformado por una serie de bloques que representan cada etapa del proceso y cuenta con pequeños cuadros sobre las líneas del flujo, que indican los principales componentes y la información relevante a conocer.



**Figura 4. 2.** Diagrama de bloques del proceso de eliminación de coliformes mediante el proceso de EO.

Es importante aclarar que previo al proceso de filtración, se deben efectuar varias operaciones unitarias de gran relevancia para el proceso de potabilización de aguas crudas, las cuales se indicaron en el numeral 4.1.2.

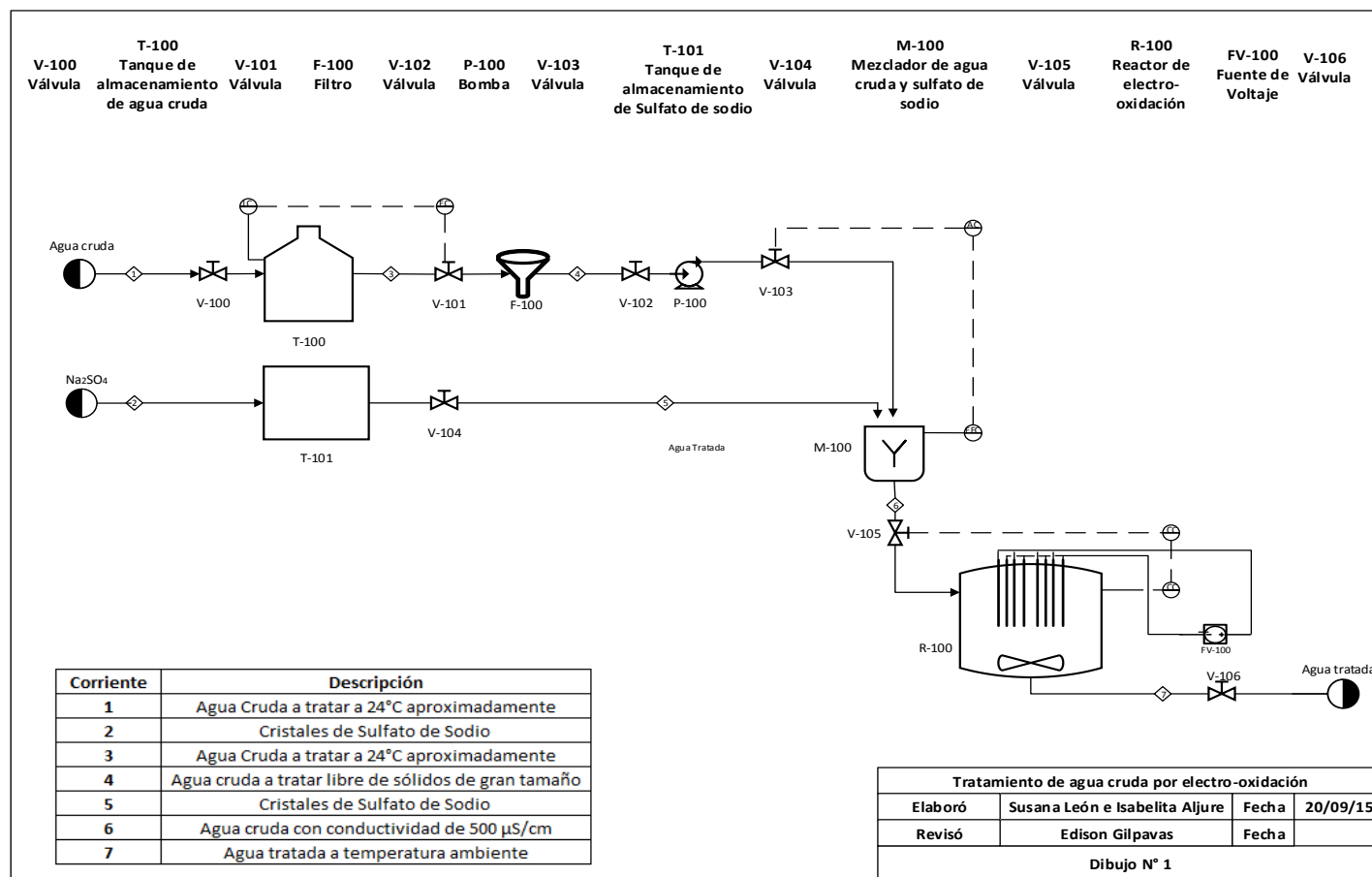
#### 4.1.4. Descripción del proceso

La operación de la planta de electro- desinfección será de 24 horas los 7 días de la semana, donde se trabaja tres turnos cada uno de 8 horas. Este es un proceso tipo batch y el tiempo de tratamiento de 30 minutos, 15 minutos de montaje y 15 minutos de descargue, por lo tanto, tiempo total por tratamiento de 60 minutos, sin embargo, el tiempo total puede variar dependiendo de la calidad inicial del agua alimentada al proceso de desinfección, luego de

haber pasado por las etapas previas dentro del proceso de potabilización, las cuales no son el tema de enfoque de la presente investigación. Se cuenta con una planta de tratamiento que trabajará 365 días al año, tratando 200 m<sup>3</sup> /día. El proceso comienza almacenando el agua cruda a tratar en el tanque T-100 y pasando esta agua por el filtro F-100 para remover todas las partículas sólidas de gran tamaño que se encuentran inmersas en el agua. El tanque T-101 almacena el Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, necesario para acondicionar la conductividad del agua para que el proceso EO ocurra correctamente (500µS/cm). Se procede a mezclar el contenido de ambos tanques en el mezclador M-100 para luego pasar al proceso de eliminación de coliformes totales y fecales en el Reactor electro-químico R-100, con un tiempo de electrólisis de 30 minutos. El reactor tiene un agitador y unos electrodos conectados a la fuente de voltaje FV-100, que suministra la energía necesaria para que se efectué la reacción y por ende la eliminación de coliformes y materia orgánica del agua. La agitación es continua durante los 30 minutos de tratamiento.

#### 4.1.5. Diagrama de flujo del proceso (PFD)

En la figura 4.3 se muestra el Diagrama de Flujo de Proceso (PFD), que representa una forma más completa y compleja el proceso, en este se pueden observar los diferentes equipos que se involucran en el proceso y las corrientes. En este diagrama, también se muestran los lazos de control utilizados para operar el proceso bajo condiciones normales (Turton *et al.*, 2009).





**Figura 4. 3.** Diagrama de flujo de proceso de EO.

#### 4.1.6. Especificaciones técnicas de los diferentes equipos

En la siguiente tabla se presentan las especificaciones técnicas de cada uno de los equipos requeridos para la implementación de la planta de electro-desinfección a escala industrial:

**Tabla 4. 3.** Especificaciones de los equipos para el proceso de electro-desinfección.

EQUIPO	Tanque (T-100)	Tanque (T-101)	Reactor EO (R-100)	Bomba (P-100 A/B)	Electrodos Ti	Electrodos DDB	Electrodos grafito	Mezclador (M-100)
Material	PVC	SS	PVC	SS	-	-	-	PVC
Diámetro (m)	-	1	2,00	-	-	-	-	-
Largo (m)	-	2	3,45	-	-	-	-	-
Volumen (m <sup>3</sup> )	10	3	10,83	-	-	-	-	10,83
Espesor (m)	-	-	0,006	-	0,005	0,005	0,05	-
Largo (m)	-	-	-	-	1	1	1	-
Ancho (m)	-	-	-	-	1	1	1	-
Cantidad	9	1	1	1	21	21	21	1
Tipo	-	-	-	Centrífuga	-	-	-	Paletas planas
Cabeza (m)	-	-	-	10	-	-	-	-
Potencia (kW)	-	-	-	0,7457	-	-	-	-
Eficiencia (%)	-	-	-	45	-	-	-	-

## 4.2. DISEÑO DE EQUIPOS

En esta parte se presentan los diferentes cálculos realizados para escalar el proceso de eliminación de coliformes mediante EO.

### 4.2.1. Diseño del reactor a escala industrial

Basándose en el reactor utilizado durante la etapa experimental, se plantea el diseño del reactor a escala industrial, el cual opera tipo batch en Polietileno de alta densidad (PEAD), operando 60 minutos por tratamiento y capacidad de 8,33 m<sup>3</sup>; los cálculos realizados para el dimensionamiento y diseño del reactor a escala industrial se presentan a continuación:

El dimensionamiento del reactor se calculó a partir de la ecuación 4.1:

$$V = \pi/4 * D^2 * L \quad (4.1)$$

Teniendo en cuenta:

V (Volumen a tratar) = 8,33 m<sup>3</sup> + 30% de margen de seguridad. Es recomendable que el volumen del recipiente sea 30% más que el volumen de diseño (Biegler, Grossmann, &

Westerberg, 1999). Por tanto, el volumen será de 10,83 m<sup>3</sup>. El Diámetro del reactor se fija a un valor de 2 m, de la ecuación 4.1 se tiene una longitud de reactor de 3,45 m.

Las especificaciones del reactor a utilizar a escala industrial se muestran en la tabla 4.4.

**Tabla 4. 4.** Especificaciones Reactor Electro- desinfección a escala industrial.

Reactor EO	R-100
Material	PEAD
Diámetro (m)	2
Largo (m)	3,45
Volumen reactor (m <sup>3</sup> )	10,83
Espesor lamina (m)	0,006

Para escalar la cantidad de electrodos que se requieren para lograr eficientemente eliminación de coliformes totales y fecales, se utilizó la ecuación 4.2 (Urtiaga *et al.*, 2009; Lin *et al.*, 2005).

$$V_1/A_1 = V_2/A_2 \quad (4.2)$$

Teniendo los siguientes datos y la ecuación 4.2, se obtuvo un Área total de los electrodos (A<sub>2</sub>) de 41,67 m<sup>2</sup>.

**Tabla 4. 5.** Datos utilizados para el cálculo del Área total de electrodos a escala industrial.

Parámetro	Valor
A <sub>1</sub> (m <sup>2</sup> )	0,0004
V <sub>1</sub> (m <sup>3</sup> )	0,00008
V <sub>2</sub> (m <sup>3</sup> )	8,33

Ahora calculamos el número total de electrodos capaces de lograr un área sumergida de 41,67 m<sup>2</sup>. Para esto se supuso una longitud de un electrodo de 1 m, 0,005 m de espesor y un ancho de 1 m para facilitar la configuración dentro del reactor, dando un valor de 2,01 m<sup>2</sup>.

$$\text{Número total de electrodos} = A_2/A_2' \quad (4.3)$$

Siendo A<sub>2</sub> el área total requerida y A<sub>2</sub>' el área de un único electrodo.

$$\text{Número total de electrodos} = \frac{41,67 \text{ m}^2}{2,01 \text{ m}^2} = 20,73 \sim 21 \text{ electrodos}$$

De la ecuación 4.3 se obtuvo que el reactor requiere 21 electrodos de DDB/grafito y 21 electrodos de titanio. El espesor de cada uno de estos electrodos será de 0.005 m.

El consumo de energía eléctrica requerida para el buen funcionamiento del proceso se tendrán en cuenta las siguientes ecuaciones de Goodridge y Scott, 1995.

$$A' = A'_2 * i \quad (4.4)$$

$$A' = 416.667 * 0,01 = 4166,67 \text{ A}$$

Donde:

A': amperaje por electrodo (A)

A'<sub>2</sub>: área sumergida total, ánodo (cm<sup>2</sup>)

i: Densidad de corriente (A/cm<sup>2</sup>)

Se calcula posteriormente la resistencia con la siguiente ecuación:

$$R = \varphi * \left(\frac{L'}{A'_2}\right) \quad (4.5)$$

Dónde:

R: Resistencia (Resistividad propia del material del electrodo ((Panizza y Cerisola, 2005))

L': Longitud del electrodo (m)

A'<sub>2</sub>: Área sumergida del electrodo (m<sup>2</sup>)

$$R = 0,01 * \left(\frac{1}{2,01}\right) = 0,0049 \Omega$$

Teniendo en cuenta los valores de resistencia y Amperaje calculados anteriormente, se calcula el Voltaje necesario para el funcionamiento de los diferentes electrodos a escala industrial y para cumplir con los requerimientos para lograr la eliminación de coliformes inmersos en el agua cruda:

$$V = R * A \quad (4.6)$$

$$V = 0,0049 * 4166,67 = 20,73 \text{ V}$$

Ahora, teniendo el amperaje y el voltaje, calculamos la potencia requerida por los electrodos con la ecuación 4.7:

$$P = V * A \quad (4.7)$$

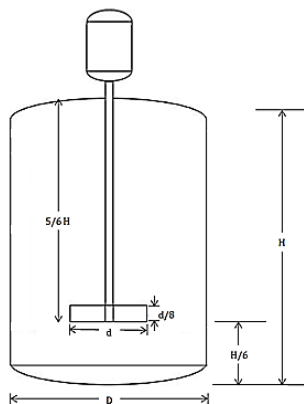
$$P = 20,73 * 4166,67 = 86,37 \text{ KWh}$$

#### 4.2.2. Diseño del agitador

Para el tratamiento EO se elige un agitador de paletas, que impulsa la mezcla líquida radial y tangencialmente, que homogeniza y evita la aparición de puntos calientes (Cheremisinoff, 2000).

El agitador se diseñó siguiendo los lineamientos propuestos por Walas (Walas, 1998), se especifica que para recipientes de fondo esférico, la relación de diámetros del agitador y el

tanque debe ser de  $\frac{d}{D} = 0.3$ , donde  $d$  corresponde al diámetro del agitador y  $D$  al diámetro del tanque. La longitud del agitador debe ser de  $5/6$  de la total altura del tanque. La distancia entre el agitador y el fondo del tanque debe ser la sexta parte de la altura total del tanque. El espesor de las paletas que componen el agitador debe ser una octava parte del diámetro del agitador. En la figura 4.4 se ejemplifican estos parámetros.



**Figura 4. 4.** Diseño de un tanque con agitación

En la tabla 4.6 se resumen las características del agitador:

**Tabla 4. 6.** Medidas de diseño geométrico del agitador para el tanque de EO.

Variable de Diseño	valor (m)
Diámetro total del tanque	2,00
Diámetro del agitador	0,60
Altura total del tanque	3,45
Longitud Agitador	2,87
Distancia mínima libre del fondo	0,57
Espesor de las paletas	0,08

Para determinar las características del agitador se requiere conocer la geometría del tanque presentada en la tabla 4.4, además de las velocidades de agitación, la viscosidad y densidad de la mezcla presentadas en la tabla 4.7.

**Tabla 4. 7.** Información requerida para el cálculo de velocidad de agitación a escala industrial.

Información	valor
Viscosidad dinámica (Pa.S)	0,001
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1001
Velocidad de agitación a nivel de laboratorio (rpm)	350

La velocidad de diseño del agitador utilizado a escala de laboratorio fue de 350 rpm. Por lo tanto, se debe calcular el valor de la velocidad del agitador a escala industrial (Green & Perry, 1997).

$$Re = \frac{D_i^2 * N_i * \rho}{\mu} \quad (4.8)$$

$$Re = \frac{D_f^2 * N_f * \rho}{\mu} \quad (4.9)$$

Donde,

$D_i$  = Diámetro de agitador a escala de laboratorio

$D_f$  = Diámetro agitador a escala industrial

$N_i$  = Velocidad angular del agitador en rpm a escala de laboratorio presentada en tabla 4.4

$N_f$  = Velocidad angular del agitador a escala industrial

$Re$  = Número de Reynolds

$\rho$  = Densidad el líquido presentada en la tabla 4.4

$\mu$  = Viscosidad dinámica del fluido a 24 °C presentada en la tabla 4.7

De acuerdo a las ecuaciones 4.8 y 4.9, se obtiene  $Re = 14675,42$ , y velocidad angular del agitador igual a 0,3889 rpm. Los resultados se resumen en la tabla 4.8.

**Tabla 4. 8.**Resultados agitador a escala industrial.

Reactor escala laboratorio		Reactor escala Industrial	
<b>Re</b>	14675,43	<b>Re</b>	14675,43
<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1001	<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1001
<b><math>\mu</math> (Pa·s)</b>	0,001	<b><math>\mu</math> (Pa·s)</b>	0,001
<b><math>D_i</math> (m)</b>	0,02	<b><math>D_f</math> (m)</b>	0,600
<b><math>N_i</math> (rad/s)</b>	36,6519	<b><math>N_f</math> (rad/s)</b>	0,0407
<b><math>N_i</math> (rpm)</b>	350	<b><math>N_f</math> (rpm)</b>	0,3889

### 4.3. ANÁLISIS ECONÓMICO

En esta sección se analizan los diferentes costos asociados a materia prima y operación basados en los equipos establecidos en el PFD, también los ingresos por ventas esperadas en un horizonte de aproximadamente 10 años con el fin de realizar un flujo de caja libre y analizar la viabilidad del proceso de EO como método de eliminación de coliformes en un planta de tratamiento de aguas crudas en zonas rurales de Colombia.

#### 4.3.1. Costo de Capital

Se analizarán los costos bajo el uso de electrodo DDB o grafito, el análisis económico de ambos escenarios nos dará la base de decisión para el planteamiento del proyecto a escala

industrial. Adicionalmente, se compran algunos muebles y enseres para la planta cuya vida útil será de 5 años. Para los equipos de producción se tiene una depreciación a 5 años. Los costos de los diferentes equipos cuyo material de fabricación es acero inoxidable (SS por sus siglas en inglés), fueron tomados de la aplicación online llamada *Matches* (Milligan & Milligan, 2014). Para aquellos cuyo material es PVC la información se tomó del catálogo de precios ofrecidos en la compañía Plastic-Mart. (Plastic-Mart, 2014) y de la información presentada en la página web de la compañía Homecenter (Homecenter, 2016).

#### 4.3.1.1. Costos de capital con electrodo DDB

Los costos de capital del proyecto, utilizando electrodo DDB se presentan en la tabla 4.9.

**Tabla 4. 9.**Costos del proyecto utilizando electrodo DDB.

Equipo	Cantidad	Costo (USD\$)
P-100	1	4.900
T-100	9	24.570
T-101	1	2.000
M-100	1	3.450
R-100	1	3.185
F-100	1	37.100
válvulas	6	168
Electrodos DDB	21	8.400.000
Agitador	1	11.900
Electrodo titanio	21	7.350
Fuente de Voltaje	1	12.000
<b>Total costo de equipos</b>		<b>8.506.623</b>
<b>INSTALACIÓN</b>		
Instalación, montaje y construcción		5.500
<b>TOTAL</b>		<b>8.512.123</b>
<b>OTROS</b>		
Escritorio	2	400
Sillas	6	480
Archivador	1	200
<b>Total muebles y enseres</b>		1.080
<b>GRAN TOTAL</b>		<b>8.513.203</b>

#### 4.3.1.2. Costos de capital con electrodo de grafito

Los costos de capital, utilizando electrodo de grafito se presentan en la tabla 4.10.

**Tabla 4. 10.**Costos del proyecto utilizando electrodo grafito.

Equipo	Cantidad	Costo (USD\$)
P-100	1	4.900
T-100	9	24.570
T-101	1	2.000
M-100	1	3.450
R-100	1	3.185
F-100	1	37.100
Válvulas	6	168
Electrodos Grafito	21	27.300
Agitador	1	11.900
Electrodo titanio	21	7.350
Fuente de Voltaje	1	12.000
<b>Total costo de equipos</b>		<b>133.923</b>
<b>INSTALACIÓN</b>		
Instalación, montaje y construcción		5.500
<b>TOTAL</b>		<b>139.423</b>
<b>OTROS</b>		
Escritorio	2	400
Sillas	6	480
Archivador	1	200
<b>Total muebles y enseres</b>		<b>1.080</b>
<b>GRAN TOTAL</b>		<b>140.503</b>

#### 4.3.2. Depreciación

En la tabla 4.11 y 4.12 se presentan los valores para la depreciación anual de todos los equipos y muebles. Para el cálculo de depreciación se utilizó la ecuación 4.10 (Turton *et al.*, 2009).

$$Depreciación = \frac{Costo - valor\ de\ desecho}{Años\ de\ vida\ útil} \quad (4.10)$$

##### 4.3.2.1. Depreciación con electrodo DDB

**Tabla 4. 11.**Depreciación de equipos, muebles y enseres en \$USD utilizando electrodo DDB.

Equipo	Cantidad	Costo (USD\$)	Depreciación
P-100	1	4.900	980
T-100	9	24.570	4.914
T-101	1	2.000	400
M-100	1	3.450	690

R-100	1	3.185	637
F-100	1	37.100	7.420
Válvulas	6	168	34
Electrodos DDB	21	8.400.000	1.680.000
Agitador	1	11.900	2.380
Electrodo titanio	21	7.350	1.470
Fuente de Voltaje	1	12.000	2.400
<b>Total costo de equipos</b>		<b>8.506.623</b>	<b>1.701.325</b>
<b>INSTALACIÓN</b>			
Instalación, montaje y construcción		5.500	0
<b>TOTAL</b>		<b>8.512.123</b>	<b>0</b>
<b>OTROS</b>			
Escritorio	2	400	80
Sillas	6	480	96
Archivador	1	200	40
<b>Total muebles y enseres</b>		<b>1.080</b>	<b>216</b>
<b>GRAN TOTAL</b>		<b>8.513.203</b>	<b>1.701.541</b>

#### 4.3.2.2. Depreciación con electrodo de grafito

**Tabla 4. 12.** Depreciación de equipos, muebles y enseres en \$USD utilizando electrodo de grafito.

<b>Equipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo (USD\$)</b>	<b>Depreciación</b>
P-100	1	4.900	980
T-100	9	24.570	4.914
T-101	1	2.000	400
M-100	1	3.450	690
R-100	1	3.185	637
F-100	1	37.100	7.420
Válvulas	6	168	34
Electrodos Grafito	21	27.300	5.460
Agitador	1	11.900	2.380
Electrodo titanio	21	7.350	1.470
Fuente de Voltaje	1	12.000	2.400
<b>Total costo de equipos</b>		<b>133.923</b>	<b>26.785</b>
<b>INSTALACIÓN</b>			
Instalación, montaje y construcción		5.500	0
<b>TOTAL</b>		<b>139.423</b>	<b>0</b>



OTROS			
Escritorio	2	400	80
Sillas	6	480	96
Archivador	1	200	40
Total muebles y enseres		1.080	216
GRAN TOTAL		140.503	27.001

### 4.3.3. Costo de materia prima

Los cálculos del consumo de las materias primas al mes se realizaron partiendo de los resultados obtenidos en la sección 4.1.4. El costo del Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> se estableció a partir de la información suministrada por la empresa Químicos JM S.A. (Químicos JM S.A., 2015):

**Tabla 4. 13.**Costo de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> requerido en un mes de operación en \$COP.

MATERIA PRIMA				
Materia prima	Cantidad (kg/día)	Costo unitario (COP\$/kg)	Costo total día (\$COP)	Costo total día (\$USD)
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	24	\$ 1.800,00	\$ 43.200,00	\$ 15,12
Total mes			\$ 1.296.000,00	\$ 453,60
Total año			\$ 15.552.000,00	\$ 5.443,21

### 4.3.4. Costos de Operación

Los costos de operación relacionados al proyecto hacen referencia al costo de la mano de obra y al costo de los servicios necesarios para el funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas mediante EO. Estos costos se muestran a continuación:

#### 4.3.4.1. Costos de mano de obra

Para calcular el número de operarios requeridos para la planta de tratamiento se siguió la metodología sugerida por Turton (Turton *et al.* 2009). Se considera que los operarios trabajan 52 semanas al año, 3 turnos de 8 horas cada uno al día 365 días del año.

$$\text{Número de operarios} = N_{ol} * \text{Factor} \quad (4.11)$$

El factor se halla con la siguiente ecuación:

$$\text{Factor} = \frac{\text{Turnos al año para producción}}{\text{Turnos año operados en Colombia}} \quad (4.12)$$

La demanda anual es de 73.000 m<sup>3</sup>/año que equivale a 1095 turnos/año. El cálculo de los turnos por año por cada operario se obtuvo a partir de la ecuación 4.13.

$$7 \frac{\text{días}}{\text{semana}} * 3 \frac{\text{turno}}{\text{día}} * 52 \frac{\text{semanas}}{\text{año}} = 1095 \frac{\text{turnos}}{\text{año}} \quad (4.13)$$

Ahora, al calcular el factor a partir de la ecuación 4.12, da un valor de 1.

Para poder calcular la cantidad de operarios requeridos para la operación de la planta, necesitamos hallar el valor  $n_{ol}$ , el cual corresponde a la cantidad de operarios sin ajustar. Dando un valor de 2.

$$N_{ol} = (6.29 + 0.23N_{np})^{0.5} \quad (4.14)$$

Donde:

- $N_{ol}$  es el número de operarios
- $N_{np}$  es la sumatoria del número de equipos que requieren mayor mano de obra (compresor, torres, reactores, calentadores, intercambiadores)

Ahora bien, teniendo el valor  $N_{ol}$  y el factor tenemos que la planta requiere 2 operarios por turno.

$$\text{Número de operarios totales día} = 2 \frac{\text{Operarios}}{\text{turno}} * 3 \frac{\text{turnos}}{\text{día}} = 6 \frac{\text{operarios}}{\text{día}} \quad (4.15)$$

Los valores de las variables de las ecuaciones anteriormente mencionadas y los resultados, se registran en la tabla 4.14.

**Tabla 4. 14.**Número de operarios

Tiempo de trabajo	
Días	7
Semanas	52
Turnos por día	3
Turnos por año	1095
Turnos requeridos	
Producción anual (m <sup>3</sup> /año)	<b>73000</b>
Duración batch (h)	1
Batch anuales	8760
Turnos anuales	1095
Cantidad de operarios	
$N_{np}$	1
$N_{ol}$	2
Factor	1
Número de operarios	<b>2</b>

Para dirigir la planta, se requiere un director de operaciones y un supervisor, además de los 6 operarios totales por día para poder cumplir con la demanda anual. El valor a pagar por un salario mínimo mensual legal vigente en 2015 es de \$ 644.350, con el cual se calculó el monto

que ganaría el personal, pero se debe tener en cuenta que el sueldo de una persona por ley incluye otros pagos que debe realizar la empresa.

El pago a cada uno de los cargos y el despliegue de las obligaciones se presentan en la tabla 4.15. (Revista Dinero, 2014). Es importante tener en cuenta que el valor salarial por cargo varía incrementalmente cada uno, por ende los valores presentados a continuación son sujetos a cambios al cambiar el porcentaje anual salarial.

**Tabla 4. 15.**Salario mensual del personal de la planta en \$COP.

Rubro	Porcentaje	Directores	Supervisores	Operarios
Salario	100,00	\$ 1.500.000,00	\$ 1.000.000	\$ 644.350
Cesantías	8,33	\$ 124.950,00	\$ 83.300,00	\$ 53.674,36
Prima de Servicios	8,33	\$ 124.950,00	\$ 83.300,00	\$ 53.674,36
Intereses a las Cesantías	1,00	\$ 15.000,00	\$ 10.000,00	\$ 6.443,50
Vacaciones	4,17	\$ 62.550,00	\$ 41.700,00	\$ 26.869,40
Auxilio de transporte	11,69	\$ 175.350,00	\$ 116.900,00	\$ 75.324,52
Parafiscales	9,00	\$ 135.000,00	\$ 90.000,00	\$ 57.991,50
Dotación	5,00	\$ 75.000,00	\$ 50.000,00	\$ 32.217,50
Salud	8,50	\$ 127.500,00	\$ 85.000,00	\$ 54.769,75
Pensión	12,00	\$ 180.000,00	\$ 120.000,00	\$ 77.322,00
ARP	0,52	\$ 7.800	\$ 5.200,00	\$ 3.350,62
<b>Total por persona</b>		\$ 2.528.100	\$ 1.685.400	\$ 1.085.987
<b>Cantidad</b>		1	1	6
<b>Total por cargo</b>		\$ 2.528.100	\$ 1.685.400	\$ 6.515.925

Este salario aumentaría el 4.6% anualmente, de acuerdo con incremento porcentual del salario mínimo en Colombia. En la tabla 4.16 se presenta el perfil y la descripción del cargo para los empleados de la planta.

**Tabla 4. 16.**Perfil de los empleados de la planta

Cargo	Cantidad	Salario	Nomina total	Perfil	Descripción del cargo
Directores de departamento	1	\$1.500.000	\$2.528.100	Pregrado	Dirigir y administrar
Supervisores	1	\$1.000.000	\$1.685.400	Técnico	Controlar y guiar la producción
Operarios	6	\$644.350	\$6.515.925	Bachilleres	Operacional

Por lo tanto el costo total por pago salarial para 6 operarios al mes, sería de \$ 6.515.925 COP, dando un total anual en USD de \$ 45.064.

### 4.3.5. Costos indirectos

Los costos indirectos del proceso están relacionados con el consumo de energía eléctrica, estos equipos que requieren consumo eléctrico son P-100 y R-100. Para el cálculo de cada equipo se utiliza la ecuación 4.16 (Turton *et al.*, 2009). Dando un total de 86,37 KWh.

$$C_n = P * h * d \quad (4.16)$$

Donde:

$C_n$ : Consumo de electricidad (kWh)

P: potencia (kW)

h: Número de horas trabajadas por día

d: Número de días trabajados al año

En tabla 4.17 se muestra el total de consumo eléctrico:

**Tabla 4. 17.**Consumo eléctrico y costo asociado a los equipos utilizando electrodo de grafito y DDB

Equipo	P	h	d	Kwh	COP	USD
<b>P-100</b>	0,75	6	365	1.633,1	\$ 817.766,3	\$ 286,2
<b>R-100 (Grafito)</b>	86,37	12	365	378.316,7	\$ 189.442.112,4	\$ 66.304,8
<b>R-100 (DDB)</b>	86,37	10	365	315.264,0	\$ 157.868.427,0	\$ 55.254,0
<b>TOTAL (Grafito)</b>				<b>379.949,8</b>	<b>\$ 190.259.878,7</b>	<b>\$ 66.591,0</b>
<b>TOTAL (DDB)</b>				<b>316.897,0</b>	<b>\$ 158.686.193,3</b>	<b>\$ 55.540,2</b>

El ahorro energético es de \$ USD 11.050,8 al utilizar electrodo de Diamante (DDB), debido a que el tiempo asociado a la producción con este electrodo permite disminuir cada ensayo 5 min, el material es menos poroso y el contacto superficial es mucho más efectivo.

Para el costo total de energía eléctrica se utiliza la ecuación 4.17. (Turton *et al.*, 2009).

$$C_t = a * C_n \quad (4.17)$$

Donde

$C_t$ : Costo total de la electricidad (COP/año) y

a: Costo de la electricidad en Colombia (500,75 COP/kWh) (EPM, 2014)

### 4.3.6. Costos Totales

Para el cálculo de los costos totales se utiliza la ecuación 4.18 (Turton *et al.*, 2009).

$$C_t = C_e + C_{MP} + C_{MO} + C_I \quad (4.18)$$

Donde,

$C_t$ : Costos totales

$C_e$ : Costo relacionado a equipos, instalación y enseres.

$C_{MP}$ : Costo asociado a materias primas

C<sub>MO</sub>: Costo asociado a Mano de Obra  
C<sub>I</sub>: Costos Indirectos de Operación

En tabla 4.18, se muestra el costo total en \$USD al utilizar electrodo DDB o de grafito.

**Tabla 4. 18.**Costo total implementación del proyecto.

<b>Electrodo</b>	<b>DDB</b>	<b>Grafito</b>
<b>Ce</b>	\$ 8.513.203,03	\$ 140.503,03
<b>CMP</b>	\$ 5.443,21	\$ 5.443,21
<b>CMO</b>	\$ 45.063,63	\$ 45.063,63
<b>CI</b>	\$ 55.540,22	\$ 66.591,02
<b>CAPITAL TOTAL</b>	<b>\$ 8.619.250,09</b>	<b>\$ 257.600,89</b>

La diferencia al implementar el proyecto con electrodo DDB es \$ 8.361.649,2 USD más costoso que al implementarlo con grafito.

#### **4.3.7. Financiación del proyecto**

Cuando se desea montar una empresa, hay una gran cantidad de escenarios a tener en cuenta a la hora de decidir el método de financiamiento. Los diferentes inversionistas, prestamistas o incluso los bancos, ofrecen varias alternativas en las que se deben tener en cuenta temas como cuota inicial, cuota de financiamiento, arandelas, entre otras. Debido a esto se debe ser muy cuidadoso a la hora de invertir o pedir un préstamo, debido a que en este tipo de negocios se manejan grandes cantidades de dinero.

Al analizar los diferentes planes que los bancos prestan, se escoge financiar el proyecto bajo el plan de cuota constante; este consiste en el pago de una cuota estable y fija. Se escoge este plan porque al hacer un préstamo conviene seleccionar el plan cuya inversión inicial sea más favorable en cuanto a costo de oportunidad y permita una generación de beneficios económicos y sociales más favorables. En la tabla 4.19 se resume la información del plan de financiación:

**Tabla 4. 19.**Plan de financiación del proyecto.

<b>ELECTRODO</b>	<b>GRAFITO</b>	<b>DDB</b>
<b>Crédito inicial</b>	\$ 158.200	\$ 8.530.900
<b>Cuota mensual</b>	\$ 3.686	\$ 198.755
<b>Pago total final</b>	\$ 221.147	\$ 11.925.317
<b>Pago amortización final + intereses</b>	\$ 218.513	\$ 11.783.305
<b>Tasa de interés</b>	15%	15%
<b>Número de veces que pago deuda</b>	1,398	1,398

#### 4.3.8. Flujo de caja libre

Se calcula el flujo de caja libre durante los primeros 10 años del proyecto, para determinar la viabilidad del proyecto.

El valor del cargo fijo y la base de consumo fue tomado de la base de datos del Acueducto de Rionegro (EMPRESAS PÚBLICAS DE RIONEGRO S.A., 2015). Con un costo de \$1100 m<sup>3</sup>/mes.

El proyecto se montará en un terreno de Rionegro, Antioquia, el cual fue dado por un habitante de la vereda para usufructo del proyecto a un término de 50 años.

Según el Código Civil Colombiano, el usufructo se constituye tanto en cosas fungibles como no fungibles, en bienes muebles e inmuebles; cuando se trata de cosas fungibles el usufructuario debe devolver igual cantidad y calidad o pagar el valor de la cosa. En cuanto a bienes inmuebles se refiere, cuando este se da por actos entre vivos como lo dice el artículo 826 del código civil debe otorgarse por escritura pública para que sea válido.

En las tablas 4.20 y 4.21 se pueden observar los flujos de caja a un término de 10 años, utilizando electrodo DDB y grafito respectivamente. En ellas se identifica los diferentes ingresos y egresos respecto a la implementación del proyecto con dichos electrodos:

**Tabla 4. 20.** Flujo de caja proyectado a 10 años en \$USD utilizando electrodo de DDB.

AÑO	0	1	2	3	4	5
Ingresos por consumo	\$ -	\$ 349.919	\$ 367.415	\$ 385.786	\$ 405.075	\$ 425.329
cobro de deudas	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Ingreso inicial	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
otros ingresos	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
<b>TOTAL INGRESOS</b>	\$ -	\$ 349.919	\$ 367.415	\$ 385.786	\$ 405.075	\$ 425.329
Costos indirectos	\$ -	\$ 55.540	\$ 58.317	\$ 61.233	\$ 64.295	\$ 67.509
Costo Materia Primas	\$ -	\$ 5.443	\$ 5.715	\$ 6.001	\$ 6.301	\$ 6.616
impuestos	\$ -	\$ 122.472	\$ 128.595	\$ 135.025	\$ 141.776	\$ 148.865
amortizaciones	\$ -	\$ 2.639.247	\$ 2.633.915	\$ 2.377.988	\$ 2.122.061	\$ 1.866.134
Costo de equipos	\$ 8.512.123	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Otros	\$ 1.080	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Depreciación total	\$ -	\$ 1.701.541	\$ 1.701.541	\$ 1.701.541	\$ 1.701.541	\$ 1.701.541
Costo Mano de Obra	\$ 17.697	\$ 45.064	\$ 47.137	\$ 49.305	\$ 51.573	\$ 53.945
<b>TOTAL EGRESOS</b>	\$ 8.530.900	\$ 4.569.306	\$ 4.575.220	\$ 4.331.093	\$ 4.087.547	\$ 3.844.611
<b>SALDO NETO</b>	-\$ 8.530.900	-\$ 4.219.387	-\$ 4.207.805	-\$ 3.945.307	-\$ 3.682.472	-\$ 3.419.282
<b>SALDO ACUMULADO</b>	-\$ 8.530.900	-\$ 12.750.287	-\$ 16.958.092	-\$ 20.903.399	-\$ 24.585.871	-\$ 28.005.153

AÑO	6	7	8	9	10
Ingresos por consumo	\$ 446.595	\$ 468.925	\$ 492.371	\$ 516.990	\$ 542.839
cobro de deudas	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Ingreso inicial	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
otros ingresos	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
<b>TOTAL INGRESOS</b>	\$ 446.595	\$ 468.925	\$ 492.371	\$ 516.990	\$ 542.839
Costos indirectos	\$ 70.885	\$ 74.429	\$ 78.151	\$ 82.058	\$ 86.161
Costo Materia Primas	\$ 6.947	\$ 7.294	\$ 7.659	\$ 8.042	\$ 8.444
impuestos	\$ 156.308	\$ 164.124	\$ 172.330	\$ 180.946	\$ 189.994
amortizaciones	\$ 143.959	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -

Costo de equipos	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Otros	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Depreciación total	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costo Mano de Obra	\$ 56.427	\$ 59.022	\$ 61.737	\$ 64.577	\$ 67.548
<b>TOTAL EGRESOS</b>	\$ 434.526	\$ 304.870	\$ 319.877	\$ 335.624	\$ 352.147
<b>SALDO NETO</b>	\$ 12.069	\$ 164.055	\$ 172.494	\$ 181.366	\$ 190.693
<b>SALDO ACUMULADO</b>	-\$ 27.993.084	-\$ 27.829.029	-\$ 27.656.534	-\$ 27.475.169	-\$ 27.284.476

**Tabla 4. 21.** Flujo de caja proyectado a 10 años en \$USD utilizando electrodo Grafito.

AÑO	0	1	2	3	4	5
Ingresos por consumo	\$ -	\$ 349.919	\$ 367.415	\$ 385.786	\$ 405.075	\$ 425.329
cobro de deudas	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Ingreso inicial	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
otros ingresos	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
<b>TOTAL INGRESOS</b>	\$ -	\$ 349.919	\$ 367.415	\$ 385.786	\$ 405.075	\$ 425.329
Costos indirectos	\$ -	\$ 66.591	\$ 69.921	\$ 73.417	\$ 77.087	\$ 80.942
Costo Materia Primas	\$ -	\$ 5.443	\$ 5.715	\$ 6.001	\$ 6.301	\$ 6.616
impuestos	\$ -	\$ 122.472	\$ 128.595	\$ 135.025	\$ 141.776	\$ 148.865
amortizaciones	\$ -	\$ 48.943	\$ 48.844	\$ 44.098	\$ 39.352	\$ 34.606
Costo de equipos	\$ 139.423	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Otros	\$ 1.080	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Depreciación total	\$ -	\$ 27.001	\$ 27.001	\$ 27.001	\$ 27.001	\$ 27.001
Costo Mano de Obra	\$ 17.697	\$ 45.064	\$ 47.137	\$ 49.305	\$ 51.573	\$ 53.945
<b>TOTAL EGRESOS</b>	\$ 158.200	\$ 315.513	\$ 327.213	\$ 334.846	\$ 343.091	\$ 351.975
<b>SALDO NETO</b>	-\$ 158.200	\$ 34.406	\$ 40.203	\$ 50.939	\$ 61.985	\$ 73.354
<b>SALDO ACUMULADO</b>	-\$ 158.200	-\$ 123.794	-\$ 83.591	-\$ 32.652	\$ 29.333	\$ 102.686

AÑO	6	7	8	9	10
Ingresos por consumo	\$ 446.595	\$ 468.925	\$ 492.371	\$ 516.990	\$ 542.839
cobro de deudas	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Ingreso inicial	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
otros ingresos	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
<b>TOTAL INGRESOS</b>	\$ 446.595	\$ 468.925	\$ 492.371	\$ 516.990	\$ 542.839
Costos indirectos	\$ 84.989	\$ 89.238	\$ 93.700	\$ 98.385	\$ 103.305
Costo Materia Primas	\$ 6.947	\$ 7.294	\$ 7.659	\$ 8.042	\$ 8.444
impuestos	\$ 156.308	\$ 164.124	\$ 172.330	\$ 180.946	\$ 189.994
amortizaciones	\$ 2.670	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costo de equipos	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Otros	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Depreciación total	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costo Mano de Obra	\$ 56.427	\$ 59.022	\$ 61.737	\$ 64.577	\$ 67.548
<b>TOTAL EGRESOS</b>	\$ 307.341	\$ 319.679	\$ 335.427	\$ 351.951	\$ 369.290
<b>SALDO NETO</b>	\$ 139.255	\$ 149.246	\$ 156.945	\$ 165.039	\$ 173.549
<b>SALDO ACUMULADO</b>	\$ 241.941	\$ 391.187	\$ 548.132	\$ 713.171	\$ 886.720

A pesar de que el costo total de implementación de este proyecto indica un valor dependiendo del electrodo elegido como se puede ver en la tabla 4.19. Para comenzar operación en el periodo 1, se requiere una inversión inicial menor a lo que indica el costo total del proyecto, esto debido a que los ingresos por consumo permiten que el punto de equilibrio y el inicio de

generación de utilidades se logren en el 4to periodo para el electrodo de grafito y que el proyecto no es factible económicamente utilizando electrodo DDB debido a su alto costo. Siendo el proyecto con electrodo de grafito el óptimo, pues permite obtener en un periodo de tiempo relativamente corto recuperación de la inversión inicial y altas utilidades, dando un valor de utilidades al final de los 10 periodos de \$ 886.720 USD, principalmente se debe a que los costos asociados a equipos es mucho menor con este electrodo, puesto que el costo de cada electrodo DDB es mucho más costoso que el electrodo de grafito. Es importante tener en cuenta que aunque con ambos electrodos se logra una completa eliminación e inactivación de microorganismos, el electrodo DDB representa un proceso más eficiente debido a que el tiempo requerido para lograr dicha eliminación es 5 minutos menor al tiempo requerido con el electrodo de grafito, indicando así un ahorro energético de aproximadamente \$11.050,8 USD. Esto se debe a que el funcionamiento del electrodo DDB representa una mayor generación de radicales  $\bullet\text{OH}$  permitiendo así que la eliminación de microorganismos sea más rápida y el proceso más eficiente. Sin embargo a pesar de los ahorros energéticos utilizando electrodo DDB, bajo un precio de venta del 3% por encima del precio del  $\text{m}^3$  con métodos convencionales en ambos casos evaluados, al final de los 10 periodos, se obtiene que no es factible implementar el proyecto con el electrodo DDB, mientras que con el electrodo de grafito se generan altas utilidades y el tiempo en que se comienza a recuperar la inversión es relativamente corto.

#### 4.4. CONCLUSIONES

Se realizó en diseño conceptual de la planta de tratamiento, específicamente enfocado en la etapa de desinfección del proceso de potabilización aguas crudas, en zonas rurales del municipio de Rionegro. El diseño de la misma se realizó utilizando dos electrodos, DDB y grafito. Al realizar el análisis económico del proyecto y la factibilidad del mismo, se observó que el electrodo factible económicamente para el proyecto es el de grafito puesto que requiere \$ 8.361.649,2 USD menos que los requeridos para la implementación con electrodo de DDB y que al analizar el comportamiento del flujo de caja del proyecto, con el electrodo DDB no es factible el proyecto. A pesar de que ambos electrodos han demostrado una alta eficiencia en la inactivación y eliminación de coliformes, *E. coli* y virus que contaminan el agua, el electrodo de grafito incluso requiriendo más tiempo para la eliminación total de los microorganismos que el requerido con el electrodo DDB, demuestra un buen resultado en el proceso y el análisis de factibilidad económica indica un comienzo de generación de utilidades a partir del cuarto periodo de operación, generando altas utilidades con una excelente calidad del agua tratada.

El costo de inversión de la planta utilizando el electrodo seleccionado, puede ser pagado bajo cuotas fijas mensuales mediante el apoyo de inversionistas interesados en temas de agua y sostenibilidad de las comunidades menos privilegiadas, por este recurso hídrico.

El aumento de la tasa para el consumidor sería únicamente de un 3% aproximadamente, donde actualmente el costo del  $\text{m}^3$  /mes en el municipio de Rionegro es de \$ 1.100 COP, y aumentaría casi hasta los \$ 1.130 COP, por lo tanto, como se mencionó al principio de esta sección, la implementación de este proyecto es viable y factible, puesto que se logra recuperar la inversión a partir del cuarto año de producción. Además, a pesar de que el costo de este



tratamiento es más alto que los métodos convencionales y se requiere una inversión inicial relativamente alta, los aspectos positivos de este método hacia la sociedad son muy altos, pues la tecnología utilizada para el tratamiento del agua, contribuye disminuyendo impactos a nivel ambiental y social al ser una tecnología limpia y que logra de manera eficiente la eliminación de microorganismos patógenos causantes de enfermedades como la fiebre tifoidea. Lo anterior promueve una mejor calidad de vida y crecimiento cultural en las comunidades donde se decidiera ejecutar su implementación.

#### 4.5. REFERENCIAS

Alcaldía de Rionegro. (2012). Plan Integral de Desarrollo Municipal: Rionegro con más futuro (2012-2015). Rionegro.

Biegler, L., Grossmann, I., & Westerberg, A. (1999). Systematic Methods of Chemical Process Design (Tercera ed.). New Jersey: Prentice Hall.

Cheremisinoff, N. (2000). Handbook of Chemical Process Equipment. Woburn: Butterworth Heinemann.

DANE. (2005). Boletín Censo General 2005- Perfil Rionegro. Rionegro.

Empresas Públicas de Medellín. (19 de noviembre de 2014). epm. Recuperado el Diciembre de 16 de 2014, de Nuestros Servicios: Energía y Gas Natural: <http://www.epm.com.co/site/Home/Institucional/Nuestrosservicios.aspx>

EMPRESAS PÚBLICAS DE RIONEGRO S.A. (2015). Obtenido de <https://www.dropbox.com/s/4tcurpqqdedfn0a/Ajuste-tarifario-para-web.jpg?dl=0>

EPA, office of water. (1999). *Combined Sewer Overflow, Technology Fact Sheet. Chlorine Disinfection*. Washington, D.C.: United States Environmental Protection Agency.

EPM. (2014). Tarifas Energía 2015. Obtenido de <http://www.epm.com.co/site/Portals/2/documentos/tarifas/2015/Publicaci%C3%B3n%20Septiembre%2011%20de%202015.pdf>

Homecenter. (2016). Obtenido de <http://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/61695/SP-tanque-10000-litros/61695>

IDEAM. (2015). Estudio Nacional del Agua. Obtenido de [http://www.engr.colostate.edu/~neilg/ce\\_old/projects/Colombia/Colombia/cd1\\_files/spanish/12%20ena%20IDEAM%20study.pdf](http://www.engr.colostate.edu/~neilg/ce_old/projects/Colombia/Colombia/cd1_files/spanish/12%20ena%20IDEAM%20study.pdf)

Lin C.J., Lo S.L., Kuo C.Y., Wu C.h., (2005). Pilot-Scale Electrocoagulation with Bipolar Aluminum Electrodes for On-Site Domestic Greywater Reuse. *Journal of Environmental Engineering*, 491-495.

Milligan, D. A., & Milligan, J. A. (2014). Matche. Obtenido de <http://matche.com/default.html>

Ministerio de protección social, ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2007). Resolución N° 2115. Colombia.

Plastic-Mart. (2014). Plastic-Mart.com. Obtenido de [http://www.plastic-mart.com/about\\_us.aspx](http://www.plastic-mart.com/about_us.aspx)

Químicos JM S.A. (2015). Productos de uso industrial. Medellín, Colombia.

Revista Dinero. (2014). ¿Cuánto le cuesta ‘de más’ contratar un empleado con salario mínimo? Obtenido de Finanzas Personales: <http://www.finanzaspersonales.com.co/>

Turton, R., Bailie, R., Wallace, W. (2009). Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes. Prentice Hall. New York, USA.

Urtiaga A., Rueda A., Anglada A., Ortiz I., (2009). Integrated treatment of landfill leachates including electrooxidation at pilot plant scale. J. of Hazardous Materials, 166, 1530-1534.

Walas, s. M. (1998). Chemical Process Equipment: Selection and Design. Boston: Butterworth-Heinemann, Edition 2.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

Durante el desarrollo de esta investigación se evaluó el proceso de EO como alternativa para la desinfección de aguas crudas. La evaluación del proceso de eliminación de coliformes se realizó utilizando una muestra de agua natural proveniente de la quebrada “la presidenta, Medellín – Colombia”, con una carga inicial promedio de 17.150 CT y 6.378 CF. Se emplearon electrodos de DDB, grafito poroso y titanio, los cuales fueron sumergidos en el agua a tratar con una distancia entre el cátodo y el ánodo de 1 cm. Las siguientes conclusiones finales pueden extraerse a partir de los resultados de la investigación:

- (i) Con base en el análisis estadístico del diseño de experimentos factorial fraccionado, se concluye que los factores con un efecto significativo sobre el %ECT y %ECF son: la densidad de corriente, el tipo de ánodo y la conductividad.
- (ii) Una segunda etapa del proyecto, permitió la optimización del proceso mediante el desarrollo de un diseño de experimentos de superficie de respuesta tipo Box-Behnken. Operando bajo una agitación de 350 rpm y una área sumergida de los electrodos de 4 cm<sup>2</sup>, se concluye que las condiciones óptimas de operación fueron: Cd= 500 µS/cm, i=10 mA/cm<sup>2</sup> y An= grafito y DDB.
- (iii) Bajo las condiciones óptimas se evaluó la cinética de muerte de microorganismos y la eficiencia del proceso, logrando una eliminación total de colonias bacterianas. Los resultados del estudio sugieren que el ajuste cinético para la eliminación de coliformes totales y fecales sigue una tendencia de primer orden. Se determinó que el efecto del tratamiento es duradero en el tiempo, no se registró recrecimiento de coliformes luego de 15 días del almacenamiento del agua tratada para consumo humano.
- (iv) Una vez finalizada la etapa de experimentación y con base en las condiciones óptimas de operación establecidas, se realizó el diseño conceptual del proceso de desinfección, para el cual se concluye que la ubicación de la planta será en el municipio de Rionegro, con una capacidad de abastecimiento de agua potable para una población rural de 1000 personas. De acuerdo a esto, se determinó que el volumen de agua cruda a tratar por día es de 200 m<sup>3</sup>, mediante un proceso tipo batch, donde cada lote tiene una duración de 1 hora, con el uso de ambos tipos de electrodo. También, se estableció que deberá operar 3 turnos al día de 8 horas cada uno, donde trabajarán dos operarios en cada turno, y se procesarán 8,33 m<sup>3</sup>/h. Se concluye también que es necesario el uso de un reactor de 2 m de diámetro y 3,45 m de largo, con un volumen total de 10,83 m<sup>3</sup>, además se operará con 21 ánodos (DDB o grafito) y 21 cátodos (titanio), que requieren una potencia eléctrica de 86,37 Kwh.

- (v) Bajo las definiciones técnicas de la planta, se realizó el estudio de factibilidad del proceso de eliminación de coliformes tanto con el uso de ánodo de DDB como con el uso de ánodo de grafito. Se concluye que los costos de implementación de este proyecto, utilizando electrodo de grafito son de \$ 257.600,89 USD, mientras que para la implementación con electrodo DDB son de \$ 8.619.250,09 USD, con lo que la implementación con grafito resulta económica en comparación a la implementación con electrodo DDB. A pesar de que el estudio de costos indirectos relacionados al consumo energético de la operación indican que con el electrodo DDB se ahorran aproximadamente \$11.050,8 USD, el análisis de factibilidad económica con electrodo de grafito se muestra factible e indica una recuperación de la inversión a partir del 4to periodo de operación generando utilidades de \$ 886.720 USD en el periodo 10, mientras que con electrodo DDB el proyecto no es factible económicamente, y aunque el precio al consumidor con el método alternativo planteado es 3% más costoso que el precio por m<sup>3</sup> con métodos convencionales, la generación de utilidades es alta. Finalmente se concluye que el proyecto es factible económicamente y que el electrodo óptimo de operación es el de grafito.

## 5.2. Recomendaciones

El proceso de EO evaluado es eficiente en la eliminación e inactivación de coliformes totales y fecales presentes en aguas crudas. En general, la implementación de un proceso avanzado de oxidación resulta ser más costoso que una operación convencional de tratamiento de aguas, sin embargo, el estudio de factibilidad realizado para el proceso de electro-desinfección, demuestra que las utilidades generadas a largo plazo son lo suficientemente altas para permitir una recuperación de la inversión inicial aproximadamente en el tercer periodo de operación, por lo que se recomienda no dejar este estudio solo como un proyecto académico, sino estudiar la posibilidad de su implementación en la realidad. En caso de implementar el proyecto, se recomienda buscar inversionistas sin ánimo de lucro, como por ejemplo una ONG, cuyo objetivo es apoyar proyectos de gran impacto social y ambiental; de esta manera, se logrará reducir la inversión inicial requerida para realizar su ejecución. Además, se recomienda que en caso de efectuar su implementación se utilice el electrodo de grafito pues sus costos de implementación son menores y el proyecto resulta viable en un corto periodo de tiempo. Debido a que uno de los recursos principales para llevar a cabo este proyecto es la electricidad, y a este está asociado el mayor costo, se recomienda utilizar una fuente de energía alternativa que permita reducir dichos costos de operación y promover la protección del medio ambiente al disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a este servicio.

Este trabajo ha sido evaluado para una concentración específica de coliformes. Se recomienda que en caso de presentar interés en la ejecución de investigaciones asociadas al tratamiento electro-químico desarrollado en el presente proyecto, el investigador interesado debe tener en cuenta que para una muestra de agua con un contenido diferente de coliformes, mayor o menor concentración, deberá realizar los procesos de investigación pertinentes, guiándose por las etapas que han sido desarrollados en este estudio (diseño de experimentos preliminar, diseño de experimento de optimización y cinéticas de muerte de

microorganismos), debido a que las condiciones óptimas de operación pueden variar según la concentración de coliformes, incluyendo los tiempos de operación en la etapa de desinfección.

## 6. ANEXOS

### 6.1. Eventos en los que se ha presentado la investigación

A continuación se enumeran una serie de eventos en los cuales ha participado el presente proyecto, desde etapas preliminares (Ante-proyecto) hasta su culminación:

- GILPAVAS, Edison, LEÓN, Susana; ALJURE, Isabelita. Inactivación de coliformes totales y fecales en fuentes de aguas rurales mediante procesos electroquímicos. ***Muestra de Proyectos de Ingeniería de Procesos (Expo-procesos)***, 22 de Mayo de 2014, Universidad EAFIT, Medellín – Colombia. \*Proyecto ganador del 2do puesto en la categoría de investigación.
- GILPAVAS, Edison, LEÓN, Susana; ALJURE, Isabelita. Inactivación de coliformes totales y fecales en fuentes de aguas rurales mediante procesos electroquímicos. ***XII Encuentro Regional de Semilleros de Investigación - nodo Antioquia***, 2-3 de mayo 2014, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín – Colombia. \*Proyecto calificado con 95/100 puntos, seleccionado para participar como representante regional a nivel nacional en el Encuentro de semilleros en Tunja (2014).
- GILPAVAS, Edison; MEDINA, José; ALJURE, Isabelita; LEÓN, Susana. Proceso electro-químico para la eliminación de coliformes en aguas naturales utilizando ánodo de diamante dopado con boro y grafito: optimización mediante la metodología de superficie de respuesta. ***XXII Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Electroquímica (SIBAE 2016)***, 14-18 de marzo de 2016, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- GILPAVAS, Edison; ALJURE, Isabelita; LEÓN, Susana; GÓMEZ Carlos; ARBELÁEZ Paula. Eliminación de coliformes en aguas naturales mediante procesos electro-químicos: optimización estadística de las condiciones de operación. ***I Congreso Colombiano de Procesos Avanzados de Oxidación (CCPAOx 2016)***, 21-24 de septiembre de 2015, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.